

Wissenschaftstheoretische Grundlagen komplexer Informationssysteme

**Eine strukturalistische Semantik empirischer und
terminologischer Information**

DISSERTATION

zur Erlangung des akademischen Grades
doctor rerum naturalium (Dr. rer. nat.)

vorgelegt dem Rat der Fakultät für Mathematik und Informatik
der Friedrich-Schiller-Universität Jena

von Diplom-Informatiker CHRISTIAN SCHÄUFLER
geboren am 06.06.1980 in Gera

Jena, den 31. Oktober 2016

Gutachter:

1. Prof. Dr. Clemens Beckstein (Friedrich-Schiller-Universität Jena)
2. PD Dr. Stefan Artmann (Leopoldina, Halle/Saale)

Tag der öffentlichen Verteidigung: 12. Juni 2017

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	5
1.1	Von der Wissens- zur Informationsgesellschaft	5
1.2	Wissen als Gegenstand der Informatik	7
1.3	Wissen als Gegenstand von Wissenschaft	16
1.3.1	Ein offener Begriff von Wissenschaft	16
1.3.2	Wissenschaftstheoretischer Strukturalismus	20
1.4	Thesen zu einem vereinheitlichten Wissensbegriff in Wissenschaft und Informatik	22
1.5	Aufbau der Arbeit	23
2	Repräsentationsweisen von Wissen	25
2.1	Einordnung und Thesen	25
2.2	Der wissenschaftstheoretische Strukturalismus	26
2.2.1	Das modelltheoretische Theorieverständnis	26
2.2.2	Das Theorieelement	28
2.2.3	Beispiel: Das Theorieelement der klassischen Partikelmechanik	35
2.3	Wissen als Gegenstand der Künstlichen Intelligenz	37
2.3.1	Termformalismus	40
2.3.2	Axiome	42
2.3.3	Ontologien	44
2.4	Strukturalistische Rekonstruktion des Konzeptuellen Kerns	45
2.4.1	Rekonstruktion formaler Ontologien versus Rekonstruktion Formaler Ontologie	45
2.4.2	Rekonstruktion des konzeptuellen Kerns formaler Ontologien als Theorieelement	47
2.4.3	Rekonstruktion von Ontologie-Erweiterungen	52
2.4.4	Rekonstruktion nicht formalisierter Bestandteile	55
2.5	Beispiel einer strukturalistisch rekonstruierten Ontologie	59
2.5.1	Rekonstruktion potentieller Modelle von <i>FAM</i>	59
2.5.2	Rekonstruktion aktueller Modelle von <i>FAM</i>	61
2.6	Fazit	64
3	Verknüpfung von Wissen	65
3.1	Einordnung und Thesen	65
3.2	Brückenstrukturen in wissenschaftlichen Theorien	66
3.2.1	Globale Strukturen der Wissenschaft	66
3.2.2	Ein Formales Framework Intertheoretischer Relationen	68
3.2.3	Äquivalenz zwischen Theorien	70

3.2.4	Reduktion und Reduktionismus	72
3.2.5	Theoretisierung	73
3.3	Formalismen verteilten terminologischen Wissens in der Wissensrepräsentation	74
3.3.1	Sprachmittel zur Verknüpfung formaler Ontologien	75
3.3.2	Funktionen der Verknüpfung formaler Ontologien	77
3.3.3	Ontology Alignments	78
3.4	Strukturalistische Rekonstruktion verteilter Ontologien	85
3.4.1	Rekonstruktion von ontologischen Sprachmitteln	85
3.4.2	Rekonstruktion von Funktionen der Verknüpfung	86
3.4.3	Rekonstruktion von Ontology Alignments	88
3.5	Eine Strukturalistische Semantik für Terminologische Verknüpfungen . .	94
3.6	Fazit	99
4	Evolvierung von Wissen	101
4.1	Einordnung und Thesen	101
4.2	Die diachronische Struktur wissenschaftlicher Theorien	103
4.2.1	Theorienetze und Spezialisierung	105
4.2.2	Strukturalistische Grundkonzepte Wissenschaftlicher Entwicklung	108
4.2.3	Theorie-Evolvierung	111
4.3	Evolvierung in der Entwicklung Formaler Ontologien	115
4.3.1	Ontology Learning	117
4.3.2	Ontology Evolution	120
4.3.3	Ontology Versioning	122
4.3.4	Ontology Merging	126
4.4	Die diachronische Struktur Formaler Ontologien	127
4.4.1	Vorbetrachtung und Motivation	127
4.4.2	Synchronische Betrachtung von Ontologie-Wandel	128
4.4.3	Diachronische Betrachtung von Ontologie-Wandel	132
4.4.4	Beispiel: ICD	137
4.5	Strukturalistische Analyse von Techniken zur Entwicklung formaler Ontogien	142
4.5.1	Ontology Evolution	142
4.5.2	Ontology Versioning	146
4.5.3	Ontology Merging	148
4.5.4	Ontology Learning	150
4.6	Fazit	152
5	Zusammenfassung	154

1 Einleitung

„Die Grenzen meiner Sprache bedeuten die Grenzen meiner Welt.“

(Wittgenstein 2003, 5.6)

1.1 Von der Wissens- zur Informationsgesellschaft

Der Umgang mit Wissen gilt als ein wesentliches Merkmal unserer Zeit [WSIS, 2005]. Wachstumsraten der global gespeicherten Informationen von jährlich 23% lassen erahnen [Hilbert und López, 2011, S. 60], daß sich mit dem Zuwachs an Information beständig auch die Art des gesellschaftlichen Umgangs verändern muß. So kennzeichnet der Übergang von der hauptsächlichlichen Produktion von Gütern (Industriegesellschaft) oder der Bereitstellung von Dienstleistungen (Dienstleistungsgesellschaft) hin zur Verarbeitung und Verteilung von Wissen den Beginn einer sogenannten *Wissensgesellschaft*. Hier werden auf das Sammeln, Organisieren und Interpretieren von Wissen wesentliche und in der Regel institutionalisierte Ressourcen verwendet [Lane, 1966, S. 650]. Um gegenwärtig gespeicherte Datenmengen in einer Größenordnung von jährlich (optimal komprimierten) $3 \cdot 10^{20}$ Byte zu verwalten [Hilbert und López, 2011, S. 60], ist neben einer gesellschaftlichen Ausrichtung, auch eine technische Unterstützung notwendig. Um die Rolle des Katalysators *Informationstechnologie* in einer Wissensgesellschaft zu betonen, wird schließlich von einer *informatisierten Gesellschaft* [Nora u. a., 1979, S. 35], oder kurz *Informationsgesellschaft*, gesprochen. Zu deren Ausbildung haben zwei gesellschaftliche Institutionen eine besondere Rolle inne: Die verschiedenen Wissenschaften zum Hervorbringen von Wissen, sowie die Informatik als Entwicklerin von Techniken zur Verarbeitung von Daten. Beide Bereiche, Wissenschaften und Informatik, sind eng miteinander verzahnt: Die Informatik ist selbst eine Wissenschaft mit einem eigenem Gegenstandsbereich und definiert sich auch aus dem Rahmen allgemeiner wissenschaftlicher Standards. Die übrigen Wissenschaften erhalten durch die Speicher- und Verarbeitungsmöglichkeiten von Daten eine vorher nicht dagewesene Quelle der Beobachtungsmöglichkeiten und Auswertungstechniken. Die Kombination aus Forschung und Informatik scheint so verheißungsvoll, daß sie bereits als neues, viertes Paradigma wissenschaftlichen Arbeitens verkündet wird [Gray, 2009].

Nicht nur läßt sich eine quantitative Beschleunigung in der Produktion von Wissen und Daten beobachten, mit der Weiterentwicklung und Verbilligung von Computertechnik hat sich auch deren Zweck-Verhältnis verändert. Während vorher Daten zu einer im Voraus festgelegten Absicht gewonnen, gespeichert und verarbeitet wurden – beispielsweise zur Fundierung von Wissen oder zu dessen Repräsentation – können Daten inzwischen in großem Umfang auf Vorrat sowie zweckungebunden erhoben und gespeichert werden. Das Anwachsen von Datenbergen führt jedoch nicht notwendig zu einem Anwachsen des

Wissensbestandes. Ebenso wenig bedeutet Datenverarbeitung bereits Wissensverarbeitung bzw. ist eine Datenverarbeitungsanlage noch kein wissensbasiertes System. Wann also ist ein Prozess zur Datenverarbeitung eine adäquate Verarbeitung von Wissen oder gar ‚Computer unterstützte Forschung‘ [Beckstein u. a., 2014]? Daß es sich dabei nicht nur um eine philosophische Frage handelt, offenbart sich im Wunsch nach einer *korrekten* Arbeitsweise der Verarbeitung der Daten. Die Beschreibung, was *korrekt* konkret bedeuten soll – kurz *die Spezifikation* –, ist der Schlüssel zwischen Anforderungen eines Anwendungsfeldes und formalen Lösungsansätzen der Informatik [Scheffe, 1999]. Die Spezifikation von Anforderungen erlaubt einen wichtigen Übergang: Für eine Anwendung wird die Interpretation von Daten mittels Expertenwissen durch eine Bewertung von Daten im Sinne einer Spezifikation ersetzbar. Wenngleich Wissen und Beobachtungsdaten schon lange vor dem Bestehen von Computertechnik entscheidend waren, ist das anfangs beschriebene Ausmaß erst mit Rechnerunterstützung und damit mit der Angabe von Anforderungen möglich, welche die Entwicklung von wissensverarbeitenden Systemen erlauben [McDermid und Denvir, 1991]. Neu ist im Informationszeitalter damit nicht nur die reine Quantität an Information, sondern auch deren präferierte Form. Die Anforderung an diese neue Form von Wissen ist vor allem, ausreichend für die Beurteilung von Daten und deren maschinellen Verarbeitung zu sein. Das Verstehen einer Spezifikationsprache gehört im Informationszeitalter zu den neuen Schlüsselqualifikationen.

Einen zweiten wesentlichen Schritt, den eine Wissensgesellschaft hin zur Informationsgesellschaft vollführen muß, ist eine Transformation des Kriteriums, Entscheidungen möglichst auf Grundlage von Wissen zu fällen, in die Konzepte der Informationstechnologie. Wann arbeitet ein automatisierter Prozess auf gegebenen Daten wissensbasiert, und wann kann dessen Ausgabe bezüglich einer Eingabe als ‚wahr‘ gelten? Ohne eine Antwort auf diese Fragen bliebe eine gewählte Informationsgesellschaft tatsächlich eine Vertrauensgesellschaft in Technikglauben [Graham, 1999, S. 10]. Unter den informationstechnischen Konzepten taucht ein Wahrheitsanspruch in zwei Verhältnissen auf: Zum einen in der Eigenschaft des Erfülltseins einer Spezifikation durch eine Realisierung. Das betrifft mit ‚Programmverifikation‘ oder ‚Konsistenztests‘ klassische, ausgereifte Gebiete der Informatik. Zum anderen findet sich ein Wahrheitsanspruch für die *Passung* von Spezifikation und der gewünschten Anwendungen. Die Diskussion über die Natur dieses Verhältnisses wird von zwei Ansichten beherrscht 1) Spezifikationen entziehen sich einem Wahrheitsbegriff [McDermid und Denvir, 1991, S. 3] und 2) Spezifikationen lassen sich stattdessen bezüglich ihrer Nützlichkeit relativ zu formulierten Anforderungen bewerten [Scheffe, 1999, S. 134]. Das so charakterisierte Verhältnis zwischen Spezifikation und Anwendung ist nicht nur erstaunlich schwach bestimmt, es wird zudem nach der Übertragung von Expertenwissen auf Informationstechnik dem Konzept ‚Wissen‘ wenig gerecht.

Eine implizite Voraussetzung einer Wissensgesellschaft besteht in der Notwendigkeit, das Sammeln, Organisieren und Interpretieren von Wissen *kollektiv* zu betreiben. Dafür muß Wissen so repräsentierbar sein, daß es einen kommunikativen Austausch erlaubt. Innerhalb jeder Gemeinschaft muß dafür eine Einigung über den dort verwendeten Sprachgebrauch herrschen. Dieser kann sich – abhängig vom Anwendungsgebiet – durch den Gebrauch von jeweils eigenen Fachtermini von anderen Fachsprachen unterschei-

den. Das Wissen der in einer Fachdisziplin verwendeten Konzepte stellt somit einen wesentlichen Schlüssel für die wissensgeleitete Arbeit in einer Wissensgesellschaft dar. Für einen Übergang zur Informationsgesellschaft bedarf das terminologische Wissen einer Übertragung auf Computertechnik. Dabei lassen sich zwei aus terminologischem Wissen gespeiste Kompetenzen unterscheiden: Einerseits die Fähigkeit zum Verständnis von Daten und Verfahren durch die Interpretation bezüglich der gewünschten Anwendung. Da es sich bei einem Verständnis um eine Erfahrung handelt, ist dieser Teil der Kompetenz prinzipiell nicht übertragbar. Zum anderen lassen sich mit terminologischem Wissen Schlüsse ziehen, die für die Verarbeitung wichtig sind. Die Anforderungen an diese Art von Schlüssen lassen sich formal spezifizieren und sind der grundlegende Anteil jeder weiterführenden Spezifikation. Wegen ihrer zentralen Bedeutung für die Repräsentation von Wissen sind (explizite) Spezifikationen von Konzeptualisierungen – kurz, *Formale Ontologien* [Gruber, 1993b, S.1] – Gegenstand einer gleichnamigen informatischen Disziplin. Spezifikationen spielen in einer Informationsgesellschaft als Darstellungsform von Wissen eine tragende technische Rolle. Formale Ontologien bilden als deren konzeptueller Anteil das Fundament jeder weiterführenden Spezifikation. Das Verhältnis zwischen formalen Ontologien und ihren Anwendungen ist jedoch bisher nur schwach bestimmt und daher nur bedingt zur Interpretation von Wissen zu bezeichnen. Für das Selbstverständnis einer Informationsgesellschaft, wissensgeleitet zu sein, ist dieser Zustand nur schwer tragbar.

Neben den verschiedenen Akteuren einer Informationsgesellschaft gibt es zwei institutionalisierte Disziplinen, die sich hauptsächlich mit der Reflexion von Wissen und dessen Gehalt in einer Informationsgesellschaft auseinandersetzen. Während die *Wissenschaftstheorie* als Teilgebiet von Philosophie und Soziologie vor allem die Konzeption von Wissen in den Wissenschaften reflektiert, untersucht die *Wissensrepräsentation* als Teilgebiet der Künstlichen Intelligenz die Verwendung von Wissen in der Informatik. Auf Grund der verschiedenartigen Verwendungszwecke ergeben sich unterschiedliche Anforderungen an die Repräsentationsweisen von Wissen. Wissenschaftliche Sprache soll vor allem ausdrucksstark und präzise sein. Alles Erklärbare auch genau ausdrücken zu können, steht damit vor anderen vorhandenen Anforderungen, wie einer leichten Verständlichkeit oder der praktischen Handhabbarkeit. Wissensrepräsentationsformalismen sollen dagegen vor allem eine effektive und effiziente rechnergestützte Verarbeitung erlauben. Die Verarbeitung soll also in vertretbarer Zeit und mit vertretbaren Anforderungen an Hardwareressourcen erfolgen. In den Wissenschaften und innerhalb der Informatik haben sich so, für die je eigenen Bedürfnisse angepaßte Darstellungsformen entwickelt. Den jeweils gegenüberliegenden Maßstäben werden die Konzeptionen von Wissen oft nicht gerecht. Insbesondere dort, wo jüngst beide Welten begannen, miteinander zu verschmelzen, wo also auf Grundlage großer Datenmengen rechnerunterstützt Wissenschaft betrieben wird, offenbart sich der Bedarf nach einem beiderseitig adäquaten Wissensmodell.

1.2 Wissen als Gegenstand der Informatik

Informatik ist die „Wissenschaft der systematischen Verarbeitung von Informationen, insbesondere der automatischen Verarbeitung mit Hilfe von Digitalrechnern“ [Engesser und Claus, 1993]. Bereits aus dieser allgemeinen Lexikon-Bestimmung wird deutlich, wie

wesentlich *Wissen* innerhalb der Informatik ist. Das Konzept taucht in dieser Explikation nämlich zweimal auf – in ‚Wissenschaft‘ sowie in ‚Information‘. Die Gattung ‚Wissenschaft‘ zeigt an, daß die Informatik einen eigenen Gegenstandsbereich mit eigenen Begriffen und Lehrsätzen besitzt. Das ‚Wissen‘ dieser Art fällt primär in die Behandlung in Abschnitt 1.3. ‚Information‘ als *Gegenstand* der Informatik kann als das zum Zweck des Problemlösens aktivierte Wissen verstanden werden [Kuhlen, 1995, S. 34]. Beide Charakterisierungen – von ‚Informatik‘ und ‚Information‘ – zusammengenommen, ergeben eine erste Bestimmung der Rolle von Wissen als Gegenstand der Informatik mit Fokus auf die Informationsgesellschaft. Wissen bezeichnet darin den Rohstoff, der teilweise nur *implizit* in Form von „kognitive[n] Strukturen oder mentale[n] Repräsentationen“ [Kuhlen, 1995, S. 38] vorliegt. Damit Wissen kommunizierbar oder durch Rechner verarbeitbar wird, muß es durch die Repräsentation in einem Zeichensystem artikuliert, also „versprachlicht“ [Bode, 1997, S. 459] und damit *explizit* gemacht werden. Explizites Wissen kann dann zur Lösung eines Problems *verarbeitet* werden. Information heißt in dieser Weise *gebrauchtes* Wissen. Information steht zu Wissen damit in einem durch Form und *Zweck* bestimmten [Wittmann, 1959, S. 14], subordinären Verhältnis. Dadurch steht Information auch in einem Teilmengenverhältnis zu Wissen [Bode, 1997, S. 459]. Das so bestimmte Verhältnis von Information und Wissen bildet eine Analogie zum Verhältnis zwischen zu (tatsächlich umgesetzter) ‚Arbeit‘ und (vorrätiger) ‚Energie‘ innerhalb eines physikalischen Systems.

Jedes Problemlösen mit Rechnerunterstützung setzt die Aktivierung von Wissen voraus und kann im obigen Sinn als Informationsverarbeitung bezeichnet werden. Einen Beitrag zum Gebiet der Informatik leistet das Problemlösen mit Rechnerunterstützung jedoch noch nicht, solange eine Problemlösung nur eigens für eine konkrete Aufgabe unter direkter Verwendung des notwendigen Fachwissens angefertigt wird. Erst mit der Loslösung von der konkreten Anwendung und der Entwicklung abstrakter generischer Methoden, betreten Methoden zur Verarbeitung von Wissen das Feld der Informatik. Innerhalb der Informatik läßt sich zunächst jedes Artefakt als Bestandteil eines Prozess der Informationsverarbeitung interpretieren. Es gibt jedoch eine Teildisziplin, die den Gebrauch von Wissen zur automatisierten Lösung von Problemen explizit macht und reflektiert. J. McCarthy charakterisiert die Arbeit innerhalb der Künstlichen Intelligenz wie folgt:

„[This] is or should be our main scientific activity — studying the structure of information and the structure of problem solving processes independently of applications and independently of its realization in animals or humans.“
(zitiert nach [Bach, 2009, S. 233])

In dieser Einschätzung von 1974 finden sich zwei wesentliche Teilaspekte, deren Stellenwert für die gesamte KI-Forschung bedeutsam ist. Zum einem bedarf intelligentes Verhalten Information, die dem Akteur zum Problemlösen zugänglich gemacht werden muß; zum anderen bedarf es Problemlöseprozessen zum Errechnen einer Lösung. In einer ersten Beschreibung der Zielsetzung eines Forschungsprogramms Künstliche Intelligenz ist diese Unterscheidung noch nicht relevant.

„For the present purpose the artificial intelligence problem is taken to be that of making a machine behave in ways that would be called intelligent if a human were so behaving.“ [McCarthy u. a., 1955]

Die Entwicklung einer eigenständigen Informatik-Disziplin mit ‚Wissen‘ und dessen Verarbeitung als dezidiertem Gegenstandsbereich – der *Wissensrepräsentation* – ist von einer Reihe an Erfahrungen und Einsichten geprägt, welche die Notwendigkeit einer eigenen Disziplin erst deutlich werden ließen. Diese Einsichten lassen sich als repräsentativ für die Verwendung von Wissen innerhalb der Informatik verstehen. Sie sollen im folgenden als konstituierende Eigenschaften der Wissensrepräsentation dargestellt werden.

1. Die erste und fundamentale Einsicht besteht darin, daß Wissen überhaupt eine zentrale Rolle im automatisierten Problemlösen spielt. Während Anhänger des *power based*-Zugangs die Rolle der involvierten Verarbeitungsprozesse als entscheidend für künstliche Intelligenz ansehen, sprechen Anhänger des *knowledge based*-Zugangs einer Fülle von Expertenwissen die entscheidende Rolle zu. Die frühe Phase der KI war mit Problemlöseprogrammen wie dem ‚Logic Theorist‘ von Alan Newell, Herbert Simon und J. C. Shaw (1956) oder dessen Nachfolger, den *General Problem Solver* (1975) vor allem vom *power-based*-Zugang geprägt. Dessen Hoffnung, KI könne sich – ähnlich wie in den Gesetzen der Physik – auf ein paar Zeilen logischen Code komprimieren lassen, hat sich indes nicht bestätigt.

„Today there has been a shift in paradigm. The fundamental problem of understanding intelligence is not the identification of a few powerful techniques, but rather the question of how to represent large amounts of knowledge in a fashion that permits their effective use and interaction.“ [Goldstein und Papert, 1977]

Bestätigt hat sich an verschiedenen Stellen, daß Experten unabhängig von ihrem Gebiet, 70000 ± 20000 Fakten erlernt haben [Reddy, 1988, S. 13]. Lenat beschreibt das Credo innerhalb des *knowledge based*-Zugangs mit ‚intelligence is a million rules.‘ Das auf ihn zurückgehende wissensbasierte System für common-sense-Wissen, Cyc, umfaßt immerhin 400000 Fakten [Lenat, 1995]. Der mit Cyc in Verbindung stehende Glaube, daß sich mit einem nur hinreichend großen Fundus an Fakten der Funke der Intelligenz schon von allein entzünden wird, ist ebenfalls das Ziel breiter Kritik [McDermott, 1993].

2. Die zweite Einsicht besteht in der Notwendigkeit, im Umgang mit großen Wissensbeständen, die Verarbeitung und das repräsentierte Wissen voneinander zu trennen. Die im Zuge des „knowledge-is-power“-Ansatzes konstruierten *Expertensysteme* sollen Antworten oder Vorschläge zur Lösung eines Problems geben, für die normalerweise ein menschlicher Experte zu konsultieren wäre. Eines der ersten und gleichzeitig Vorlage vieler weiterer Expertensysteme war DENDRAL [Buchanan u. a., 1969]. Dessen Aufgabe bestand darin, Chemikern bei der Identifikation unbekannter organischer Moleküle anhand von Massenspektrometerdaten zu unterstützen. In DENDRAL wurde das Expertenwissen noch in Form von spezifischen Kontrollstrukturen angelegt. Obgleich dadurch ein Maximum an Freiheit und Ausdruckstärke erzielt werden kann, hat sich diese Art der Codierung als schwer zu warten und nicht wiederverwendbar gezeigt. Einen Schritt in Richtung Trennung von Wissen und Verarbeitung stellen Expertensystem-*shells* dar. In ihnen lagen die domänenunabhängige Kontrolle (bzw. der Inferenzmechanismus) getrennt von den domänenspezifischen Produktionsregeln vor. Ein frühes solches System ist der DENDRAL-Nachkömmling MYCIN [Shortliffe, 1976] zur Identifizierung von Bakterienspezies anhand von Infektionssymptomen.

3. Die dritte Einsicht besteht in den Vorteilen einer logikfundierten Semantik der verwendeten Wissensrepräsentationsformalismen. Einhergehend mit der Abstraktion von der Verarbeitung kam es zu einer Loslösung des Kontrollflusses von den domänenabhängigen Regeln. Bei den ersten Expertensystemen, die eine Trennung von Wissen und Verarbeitung aufwiesen, handelt es sich um sogenannte *regelbasierte Systeme*. Sie repräsentieren Wissen in einer Menge von Produktionsregeln, jeweils aus *Prämisse* und *Konklusion*. Bei Vorhandensein der Prämisse wird bei Anwendung der Regel ein neuer Token, die Konklusion, erzeugt. Regelbasierte Systeme sind in ihrer Grundstruktur stark orientiert an dem Konzept des *Physical Symbol Systems* (PSS) [Newell und Simon, 1976]. Dieses abstrakte Modell einer Problemlösearchitektur umfaßt eine Menge von aus Symbolen gebildeten Strukturen, welche ihrerseits von einer Menge von Prozessen erzeugt, modifiziert, reproduziert und entfernt werden können.

Ein anderer verbreiteter Repräsentationsformalismus entstammt dem Gebiet der natürlichen Sprachverarbeitung. Als Werkzeug zur Repräsentation der Semantik natürlicher Sprachen entstanden dort die *Semantischen Netze*. Dabei handelt es sich um graphische Notationen zur Repräsentation von Wissen in der Form von Knoten (*labels*), welche für Objekte oder Werte stehen, und (benannte) Kanten (*links*) zwischen Knoten, welche die Beziehung zwischen Objekten oder Objekten und Werten bezeichnen. Ein frühes System, in dem Wortbedeutungen innerhalb eines Netzes definiert werden und mit dem einfache Fragen beantwortet werden konnten, wird in [Simmons, 1966] beschrieben. Im Kontext der Sprachverarbeitung erhalten die Bestandteile semantischer Netze ihre Bedeutung, wenn sie in der Sprache des Anwenders interpretiert werden. Dank ihrer Anschaulichkeit haben Semantische Netze trotz ihrer weniger formalen Semantik einen Platz vor allem in der Psychologie und der Kognitionstheorie gefunden [Collins und Quillian, 1970].

So universell diese „qualitative Struktur“ konnektionistischer intelligenter Systeme sein mag, so schwer beherrschbar ist sie. Zusicherungen bezüglich maximaler Antwortzeiten, Ableitungsstärke oder Konsistenz lassen sich trotz ihrer Anschaulichkeit nur schwer überprüfen. Für den Einsatz in verantwortungsvollen Anwendungsbereichen ist es außerdem wünschenswert, neben Problemlösungen auch deren Begründung zu erhalten. Problematisch bleibt auch das Vertrauen in Systeme basierend auf Semantischen Netzen, deren Selbstverständnis dediziert ‚anti-logisch‘ bzw. ‚scruffy‘ ist. Auf Logik basierende Formalismen profitieren hingegen sowohl von den angenehmen Eigenschaften der Logik, wie der wohldefinierten Semantik und der (semi-)Entscheidbarkeit von Beweisen, als auch von einem Fundus an Kenntnissen über Kalküle und deren Eigenschaften. Bei Prolog handelt es sich um ein frühes, auf Logik basierendes wissensverarbeitendes System. Prolog stellt eine Spezialform eines regelbasierten Systems dar, in welchem im Resolutionskalkül auf Klausellogik-Termen operiert wird.

4. Die vierte Einsicht besteht in der Trennung von konzeptionellem und propositionalem Wissen. Trotz ihrer positiven Eigenschaften bieten logikbasierte Repräsentationen von Wissen noch keine Leitschnur, wie Wissensbestände in der Größenordnung von 10000 und mehr Fakten zu strukturieren sind. Logische Theorien zur Repräsentation von Wissen können darüber hinaus schwer beherrschbare Eigenschaften aufweisen. Innerhalb einer axiomatisierten logischen Theorie lassen sich zwei Arten von Termen unterscheiden. Explizite definierte Terme werden durch genau ein Axiom repräsentiert; die Axiome zur

Definition implizit definierter Terme erstrecken sich über mehrere Axiome, und lassen sich in einer klassischen Charakterisierung durch *genus* und *differentia* nur schwer ablesen. Sie liegen somit verteilt über der Axiomatisierung vor. Die Modifikation einer Theorie, insbesondere die Revision abgeleiteter Theoreme, ist nicht trivial und im Falle großer Wissensbasen praktisch unmöglich. Minsky [1974] stellt einen Ansatz zur nicht-verteilten Strukturierung von Wissensbasen vor, der von durchschlagendem Einfluß auf die gesamte Disziplin ist.

Frames sind eine Notationen semantischer Netze, wobei Frames für stereotypische Situationen stehen und durch eine Reihe von typischen Eigenschaften (vermittels Kanten) charakterisiert sind. Eigenschaften werden durch von Frames ausgehenden Kanten, dessen *Slots*, dargestellt. Da *Slots* nicht (mit *slot-fillern*) belegt sein müssen bzw. mit typischen (*default*-) Werten belegt werden können, die zudem austauschbar sind, können mit Frames Standardsituationen beschrieben werden. Laut Minsky ist die Ähnlichkeit zu der, beim Menschen anzutreffenden prototypischen Wissensrepräsentation ein Indiz für die Ergonomie und Adäquatheit von Frames. Frames sind objektzentriert und unterstützen – da eine Nachbarschaft im Netz auch eine semantische Nachbarschaft bedeutet – die Wartbarkeit und das *retrieval* von Wissensbasen durch ihre Struktur. Andererseits sind Frames in der Form von Minsky nicht-logisch. In sogenannten Frame-basierten Wissensrepräsentationsystemen wird an der objektzentrierten Repräsentation mit Frames und Slots festgehalten, jedoch wird neben anderen Vereinfachungen eine explizite Unterscheidung zwischen Klassenframes und Individuenframes eingeführt. Mit Frame-basierten Systemen wie KL-ONE [Brachman und Schmolze, 1985] erfolgte so eine Annäherung an Logik-basierte Repräsentationsformalismen mit ihrem Grundaufbau in Begriff, Urteil, Schluß. Für das praktische Design einer Wissensbasis gibt diese Unterscheidung eine besondere Modularisierung vor. Terminologisches Wissen ist prinzipiell weniger Veränderungen unterworfen als Faktenwissen; der terminologische Anteil einer Wissensbasis (*terminological box*, kurz: TBox) bleibt damit möglichst stabil. Das Revisionsproblem bleibt für den terminologischen Anteil damit vergleichsweise gering. Aufbauend auf dem terminologischen Wissen läßt sich propositionales Wissen über Individuen definieren (*assertional box*, kurz ABox). Es ergibt sich ein zweischichtiger ‚hybrider‘ Aufbau einer Wissensbasis aus TBox und ABox und damit eine grundlegende Strukturierung des Wissens in einen weit immunisierten Kern sowie in variable und leicht veränderbare Propositionen.

Neben dem primären Ziel, Probleme zu lösen, gibt es eine Reihe von sekundären, pragmatischen Anforderungen, die wissensbasierte Software erfüllen sollte. Wissensbasierte Software sollte

- ein klar abgrenzbares Problem lösen können, das andererseits von einem menschlichen Experten zu lösen wäre,
- flexibel sein, neues Wissen inkrementell in den bestehenden Wissensbestand zu integrieren,
- es erlauben, Wissen herauszulösen, zu strukturieren und zu übermitteln,
- Wissen in einer Form anzeigen können, die einfach zu lesen ist,

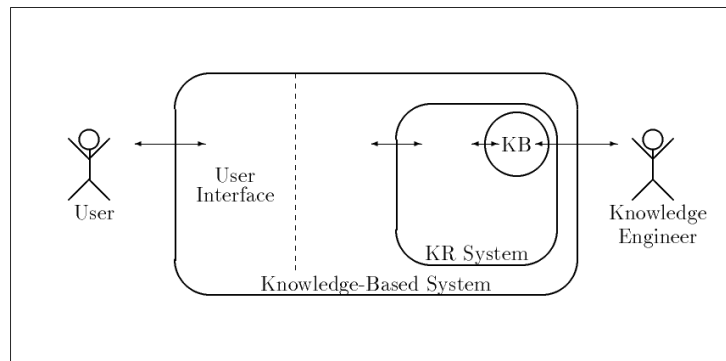


Abbildung 1.1: Struktur von Wissensrepräsentationsszenarien (aus [Nebel, 1990]).

- Erklärungen für das eigene Verhalten liefern können,
- in der Lage sein, mit geschätztem oder unexaktem Wissen umzugehen und
- einfachen Sätzen natürlicher Sprache verarbeiten können. [Walker, 1986]

Mit der Einsicht in die notwendigen Funktionen wissensbasierter Software sowie der Etablierung grundsätzlicher Designentscheidungen beginnt die Zeit der standardisierten Wissensrepräsentationssysteme wie LOOM[MacGregor, 1991b], Pellet[Sirin u. a., 2007] oder RacerPro[Haarslev u. a., 2012]. Sie bilden gegeneinander austauschbare und domänenunabhängige Komponenten in wissensbasierter Software. Wissensrepräsentationssysteme übernehmen die Aufgabe, grundsätzliche Anfragen in Bezug auf eine Wissensbasis zu beantworten. Die generische Form eines wissensbasierten Systems und die Art der Interaktion ist in Diagramm 1.1 zusammengefaßt.

Von der Wissensbasis zum Semantic Web

Beim klassischen Expertensystem wird die Wissensbasis von einem Wissensingenieur erstellt und gepflegt und es ersetzt jeweils einen Domänenexperten. Diese lokale Konstruktion und Verwendungsweise von Wissensbasen zum Problemlösen ist vom Durchsatz vernetzter Informationssysteme einer Informationsgesellschaft weit entfernt. Für gesellschaftliche Relevanz muß Wissen in wirtschaftlich und gesellschaftlicher signifikanter Dimension verarbeitet werden. Mit dem World Wide Web gibt es bereits ein Medium, das elektronischen Zugriff auf einen relevanten Wissensbestand bietet. Die Wissensressourcen des WWW sind allerdings nicht primär für die maschinelle Verarbeitung, sondern im Wesentlichen für Menschen aufbereitet. Das Kerndesign des WWW sieht Informationen in Dokumenten gegliedert vor, die lediglich bezüglich ihrer (Hyper-)Textstruktur ausgezeichnet sind [Berners-Lee, 1989]. Die Vision des Semantic Webs sieht eine Erweiterung des für Menschen lesbaren WWW um maschinenlesbares Wissen vor:

„Was wäre, wenn der Computer den Inhalt einer Seite aus dem World Wide Web nicht nur anzeigen, sondern auch seine Bedeutung erfassen würde? Er könnte ungeahnte Dinge für seinen Benutzer tun und das vielleicht schon bald, wenn das semantische Netz etabliert ist.“ [Berners-Lee u. a., 2001]

Für die Umsetzung einer Verarbeitung verteilten Wissens müssen bezüglich der Repräsentation zwei Voraussetzungen erfüllt sein.

1. Zum einen bedarf es eines Standards für einen Repräsentationsformalismus. Standardisierte Formalismen zur Repräsentation von Wissen gibt es mit KIF [Genesereth und Fikes, 1992] bereits seit der Modularisierung von Wissensrepräsentationssystemen. Diese erweisen sich jedoch als Grundlage eines Semantischen Webs als nicht adäquat. Einerseits entstammen sie einer Tradition der Wissensrepräsentation, die mit den grundlegenden Techniken und Konzepten des WWWs nur schwer vereinbar sind. Web-Standards wie HTTP, RDF und XML müssen als Basistechniken jedoch adaptiert werden können, wenn die Infrastruktur des WWWs weiterverwendet werden soll. Mit Sprachen wie SHOE [Luke u. a., 1996] auf HTML-Basis oder DAML [Hendler und McGuinness, 2000], auf KIF aufbauend und XML-codiert, entsteht ein neuer Zweig von Wissensrepräsentationsformalismen welche die Grundideen und Techniken des WWW fortführen. Andererseits ist die Heterogenität der Anwendungen eines Formalismus so groß, daß die an ihn gestellten Anforderungen eigentlich unvereinbar werden. Mit *Ausdrucksstärke* und *Berechnungskomplexität* stehen sich zwei Spracheigenschaften gegenüber, deren trade-off bezüglich der Auswahl der Sprache von Anwendung zu Anwendung verschieden liegt. Mit dem Repräsentationsformalismus OIL [Fensel u. a., 2001] wurden daher basierend auf beschreibungslogischen Sprachen, verschiedene ‚Schichten‘ von Teilsprachen mit zunehmender Ausdrucksstärke eingeführt. Der aktuelle vom W3C-empfohlene Semantic-Web-Formalismus OWL [Bechhofer u. a., 2004], integriert sich als Nachfahre von DAML und OIL in die aktuellen WWW-Techniken, und wird dem verschiedenen Bedarf an Ausdrucksstärke durch verschiedene Varianten gerecht.

2. Neben einem Standardformalismus bedarf ein Informationsaustausch zwischen verschiedenen Beteiligten einer geteilten, impliziten Ontologie. In klassischen Wissensrepräsentationssystemen stammen Konzeptualisierung und Wissensbasis aus einer Hand – der des Wissensingenieurs. Dadurch ist sichergestellt, daß beiden Teilen der Wissensbasis – TBox und ABox – dieselbe Konzeptualisierung zugrunde liegt. Mit dem Semantic Web stammen eingebundene Wissensbasen aus verschiedenen Händen. Dadurch muß eine gemeinsame Konzeptualisierung explizit sichergestellt werden. Konzeptualisierungen selbst sind jedoch mental repräsentiert und entziehen sich der Feststellbarkeit von Gleichheit. Um eine konzeptuelle Teilübereinkunft zum Zweck eines Informationsaustausch sicherzustellen, können jedoch die in diesem Rahmen wenigstens notwendigen Eigenschaften festgeschrieben werden. Eine Ontologie ist eine geteilte explizite Spezifikation einer Konzeptualisierung [Gruber, 1993b]. Beim Erstellen einer Ontologie werden zum einen Konzepte benannt, zum anderen werden die für den Austausch notwendigen Eigenschaften der Konzeptualisierung explizit und damit verbindlich gemacht. Auch wenn es sich bei Ontologien formal um Terminologien handelt, ist das verbindliche ‚Commitment‘ bezüglich der Verwendung des zugrundeliegenden Vokabulars, eine wesentliche und neue Eigenschaft [Davis u. a., 1993].

Die Konzeption formaler Ontologien trifft neben Konzepten der Künstlichen Intelligenz auch andere Teildisziplinen der Informatik. Sie sind daher – in teils spezialisierter Ausprägung – wesentlicher Bestandteil beim Entwurf von Datenbankmanagementsystemen oder in der Softwareentwicklung [Smith und Welty, 2001, S. 2]. Mit dem Verständnis von

formalen Ontologien als träges verteiltes Wissen [Davis u. a., 1993] ergeben sich eine Reihe von neuen Problemstellungen die im soweit dargestellten Kanon wissensbasierter Software noch nicht relevant waren – im Folgenden gruppiert unter 1. dem Wahrheitskriterium formaler Ontologien, 2. dem holistischen Anteilen mehrerer formaler Ontologien, sowie 3. der Bedeutungsdynamik formaler Ontologien.

1. Formale Ontologien spiegeln gegenwärtig in erster Linie einen pragmatischen Informationsbegriff und weniger einen wahrheitsgebundenen Wissensbegriff wieder. Der Gehalt klassischer, lokaler Wissensbasen ist noch primär über dessen Nutzen – die Befähigung zum Problemlösen – definiert. Lokale Wissensbasis besitzen im wesentlichen einen subjektiven Wahrheitsanspruch. Formale Ontologien stehen demgegenüber in nur indirektem Bezug zu den wissensbasierten Systemen in denen sie zum Einsatz kommen. Ihr Entwurf findet in der Regel unter Beteiligung verschiedener Parteien statt, welche Ontologien für je eigene Zwecke einsetzen. Ontologien stellen damit einen Sprachkonsens her, dessen Gehalt intersubjektiv ist. Dem klassischen Anspruch von Wahrheit oder Objektivität wird das Wissen in Form Formaler Ontologien damit noch nicht gerecht [Kuhlen, 1995, S. 39]. Smith und Mark betonen sogar:

„It cannot be stressed too much that from the information science perspective, ontology is a strictly pragmatic enterprise.“ [Smith und Mark, 2003, S. 6]

Weder über das Bezugssystem, in dem Ontologien interpretiert werden sollten, noch über das System, durch das die Elemente einer Ontologie ein *Grounding* erhalten sollen, herrscht Konsens [Smith, 2005]. Eine Bestimmung, die Formale Ontologien nicht als Wissen, sondern lediglich als Begriffsexplikation oder Commitment versteht, verstärkt zudem die weiteren Problemstellungen.

2. Eine der acht Grundanforderungen im Design des WWWs ist dessen Nicht-Zentralität:

„Information systems start small and grow. They also start isolated and then merge. A new system must allow existing systems to be linked together without requiring any central control or coordination.“ [Berners-Lee, 1989]

Das aus der Dezentralität resultierende Szenario verteilten Wissens wird vom Semantischen Web mit geerbt. Wissensbasen entstehen eigenständig und ohne konzertierte Planung und bedürfen einer Verknüpfung, wenn das Wissen einander zugänglich gemacht werden soll. Der Austausch von Wissen zwischen verschiedenen Akteuren erfordert eine geteilte Konzeptionalisierung. Im Kleinen bilden Formale Ontologien die Agreements, die sicherstellen, daß die (unzugänglichen) Konzeptionalisierungen aller Beteiligten für den gewünschten Zweck übereinstimmen. Im Großen haben verschiedene Gruppen von Akteuren ihre jeweils eigenen Agreements in Form Formaler Ontologien verabschiedet. Um in diesem Fall eine übereinstimmende Konzeptionalisierung (und Sprache) sicherzustellen, werden zwei Ansätze unterschieden [Parent und Spaccapietra, 2009, S. 16]: Zum einen können sich alle involvierten Akteure auf eine neue Formale Ontologie einigen, die gleichzeitig die bisherigen Ontologien ablöst. Zum anderen können die vorhandenen Ontologien ihre Eigenständigkeit behalten, werden aber durch Verknüpfungen ins Verhältnis gesetzt. Für diese sogenannten *Module* aus Ontologie und Link stellt sich, wie auch für einzelne

Ontologien, die Frage nach deren Gehalt. Während vor allem pragmatische Kriterien des funktionierenden Zusammenspiels breite Anwendung finden [Grau u. a., 2013], lassen sich in der Definition der Semantik von Formalismen und noch mehr im Bezugssystem für einen verifizierbaren Wahrheitsgehalt offene Fragen ausmachen [Schäufli u. a., 2013]. Insbesondere gilt es zu erklären, wie die Identität von Individuen unabhängig von einer Konzeptionalisierung festgestellt werden können soll. Zugespitzt lautet die Frage: Was *ist* ein Individuum jenseits seiner Eigenschaften? Verschärft wird die Frage nach dem Gehalt einer Ontologie durch eine oft ambige Verwendung der Begriffe Modul und Ontologie. Da bis auf wenige Ausnahmen alle praktisch eingesetzten Ontologien einen Bezug zu anderen Ontologien enthalten, müßte genau genommen von Modulen gesprochen werden. Die Frage nach dem Gehalt eines Moduls kann eine ganze Kaskade von anderen Modulen und Ontologien beinhalten. Mit einem oft anzutreffenden vagen Verständnis von Teil und Ganzem zusammenhängender Ontologien erscheint es um so schwerer, die Frage nach dem Gehalt einer „Ontologie“ zu definieren.

3. Ontologien sind einem ständigen Wandel unterzogen, da sich die Anforderungen an eine Formale Ontologie über die Zeit wandeln können. Die verschiedenen damit verbundenen Problemstellungen werden unter dem Begriff *ontology-change* zusammengefaßt. Im klassischen Szenario lokaler Expertensysteme sind solche Änderungen stets für einen bestimmten Zweck intendiert und damit überschaubar. Handelt es sich bei Entwicklern und Anwendern einer Ontologie jedoch um verschiedene Parteien, ist nicht jede Modifikation einer Ontologie allgemein intendiert. Da jeder Teil einer Wissensbasis an eine Konzeptionalisierung gebunden ist und eine Modifikation der zugrundeliegenden Ontologie den konzeptionellen Rahmen der Wissensbasis verlassen kann, erzwingen Modifikationen gegebenenfalls die Anpassung des gesamten Wissensbestandes. Aufgrund des Aufwands, den solche Änderungen bedeuten, tendieren Anwender formaler Ontologien zu einer konservativen Änderungspolitik in der Entwicklung ihrer eingesetzten formalen Ontologien. Es zeigt sich, daß das einfache Verständnis einer Terminologie als beschreibungslogische Theorie den Herausforderungen einer verteilten Nutzung und Entwicklung nicht gerecht wird [Flouris u. a., 2008]. Damit droht dem Semantic Web aber eine Zersplitterung. Um diesem Problem sich wandelnder Ontologien zu begegnen, wurden eine Reihe von Ansätzen herausgebildet. Zum einen sind das gute Praktiken der Ontologieentwicklung (*ontology evolution*, [Hoog, 1998]). Dabei handelt es sich um standardisierte Arbeitsabläufe, welche die Notwendigkeit inkompatibler Modifikationen an einer Formalen Ontologie möglichst gering halten. Zum anderen handelt es sich um Techniken, die den Umgang mit verschiedenen Ontologieversionen automatisieren (*ontology versioning*). Dies beinhaltet zum einen, Annotationen zur Klassifikation einzelner Änderungen [Palma u. a., 2009], [Guarino und Welty, 2004] und zum anderen eine Infrastruktur zur möglichst transparenten Handhabung parallel eingesetzter Ontologieversionen (*ontology versioning*).

Werden Begriffe als nicht in Raum und Zeit angesiedelt verstanden, wird die Vorstellung eines sich im Laufe der Zeit wandelnden Begriffes bereits problematisch. Werden Begriffe dagegen in der Zeit und veränderlich mit der Zeit verstanden, offenbart sich das Problem der Identität von Begriffen in Angesicht von Veränderung. Das Sprechen von einem bestimmten Konzept kann dann auf eine konkrete Explikation verweisen oder auf ein Verständnis des Konzeptes als Ganzen. Während für die Explikation des Gehaltes

eines konkreten Begriffsverständnisses mit Beschreibungslogiken adäquate Formalismen existieren, herrscht ein Defizit in Beschreibungsmitteln für das invariante Wesen eines Begriffes.

1.3 Wissen als Gegenstand von Wissenschaft

Die Vorstellung von einer Wissensgesellschaft wird seit ihrer Entstehung mit einer zentralen Rolle wissenschaftlicher Forschung verknüpft [Bell u. a., 1979, S. 41]. Die empirischen Merkmale dieser Rolle bestehen in einer zunehmenden Eingebundenheit in andere gesellschaftliche Prozesse sowie einem Anwachsen der wissensproduzierenden – im Verhältnis zur gesamten wirtschaftlichen Leistung [Lane, 1966]. Auch wenn die frühe Vorstellung einer wissenschaftlichen Durchdringung aller gesellschaftlichen Bereiche inzwischen in Frage gestellt wird [Wehling, 2003, S. 119], gelten Wissenschaften gemeinhin als die Instanzen zur Beurteilung von Wahrheitsansprüchen [Weingart, 2005, S. 341]. Was eine Wissenschaft ist und wann Wissen wissenschaftlich genannt werden darf, wird mit diesen Charakterisierungen noch nicht definiert. Der Wunsch, eine Abgrenzung von Wissenschaft zu Para- oder Pseudowissenschaft beschreiben zu können, ist ein zentrales Motiv wissenschaftstheoretischer Programme. Indes muß festgestellt werden, daß bis jetzt keine Bemühung, ein Kriterium von Wissenschaftlichkeit zu finden, allgemeine Anerkennung fand [Laudan, 1983, S. 111]. Das ist zum einen problematisch für die Wissenschaftstheorie selbst, die als Disziplin eine verbindliche Beschreibung ihres Gegenstandsbereiches schuldig bleibt. Zum anderen findet sich im Sprachgebrauch derjenigen, die die Wörter ‚wissenschaftliches Wissen‘ oder Wissenschaftlichkeit verwenden, eine Kontroverse. Es soll daher im weiteren Verlauf in zwei Schritten vorgegangen werden. In einem ersten Schritt soll ein offener Begriff von Wissenschaftlichkeit entworfen werden. Dazu werden typische Anforderungen an Wissenschaften motiviert sowie prominente Kriterien zu deren Explikation vorgestellt. In einem zweiten Schritt soll ein konkretes Modell wissenschaftlichen Wissens vorgestellt werden.

1.3.1 Ein offener Begriff von Wissenschaft

Eine erste Annäherung an einen Begriff von Wissenschaft soll im Folgenden über eine Reihe von ‚kommentierungswürdigen Eigenschaften‘ geschehen, die sich im Zusammenhang ‚wissenschaftlicher‘ Beispiele immer wiederfinden (die Auswahl folgt [Charpa, 1996, S. 22f]).

1. Wissenschaft besitzt eine personelle Ebene. Damit geht einher, daß Forscher in Ihrer Arbeit menschlichen Möglichkeiten und Beschränkungen unterworfen sind. Sie sind geleitet durch Handlungsmotive, die teils fachlich, teils persönlicher und teils institutioneller Art sind. Sie haben weiterhin ein individuelles Profil an Kenntnissen, Fertigkeiten und Ausstattung.
2. Daten werden gewonnen und gehen in den wissenschaftlichen Prozess ein.
3. Forscher treten für ihre Theorien ein. Mit Theorien lassen sich Phänomene beschreiben, mitunter erklären, mitunter prognostizieren.

4. Wissenschaft und deren Kontroversen besitzen einen begrifflichen Anteil. Terminologien bilden eine Voraussetzung für die Bildung von Theorien.
5. Innerhalb jeder Disziplin gelten Prinzipien bezüglich Grundüberzeugungen, Methodik, Verschriftlichung.
6. Prinzipien, Daten, Begriffe und Theorien werden zu Argumenten verknüpft, die das Eintreten einer Forschers für eine Theorie in einer wissenschaftlichen Debatte begründen sollen.
7. Alle Aspekte von Forschung beinhalten Momente von Dauer und von Wandel.

Bereits aus dieser ersten Sammlung von Aspekten wird deutlich, daß das Phänomen Wissenschaft mehr umfaßt als eine Sammlung von Gesetzmäßigkeiten. Weiterhin läßt sich beobachten, daß das in Wissenschaft involvierte Wissen zum einen nicht durchgehend wissenschaftlich im engeren Sinn ist. Zum Beispiel das Versenden elektronischer Nachrichten, oder der Satz wissenschaftlicher Publikationen. Zum anderen ist nicht alles wissenschaftliche Wissen explizit. Prinzipien oder heuristische Erfahrung in der Wahl von Modellen oder handwerkliche Fähigkeiten in der Herstellung von Artefakten und Anschauungsstücken sind Wissen, lassen sich jedoch nur schwer explizieren oder weitergeben. Schränkt man mit Blick auf die Wissensgesellschaft Wissenschaft auf explizites Wissen ein, gelangt man zu einem gängigen Bild von Wissenschaft als System von Aussagen.

„Unter ‚Wissenschaft‘ verstehen wir einen widerspruchsfreien Zusammenhang von Satzfunktionen (Aussageformen) oder geschlossenen Satzformeln (Aussagen), die einer bestimmten Reihe von Satzbildungsregeln entsprechen und den Satztransformationsregeln (logischen Ableitungsregeln) genügen oder aber wir verstehen darunter einen widerspruchsfreien Beschreibungs- oder Klassifikations- und/oder Begründungs- oder Ableitungszusammenhang von teils generellen, teils singulären, zumindest indirekt intersubjektiv prüfbaren, faktischen Aussagen, die einer bestimmten Reihe von Satzbildungsregeln entsprechen und den Satztransformationsregeln (logische Ableitungsregeln) genügen.“ [Wohlgemant, 1969, S. 197]

Faßt man die phänomenologische Kennzeichnung von Wissenschaft durch Charpa und die formale durch Wohlgemant zusammen, heißt es, die phänomenologischen Aspekte nach Charpa in Form von Satzfunktionen und Satzformeln zu formulieren. Dabei ergeben sich verschiedene Typen wissenschaftlichen Wissens mit jeweils eigenen spezifischen Anforderungen.

Der wahrscheinlich prominenteste Typ von Wissen in einer Wissenschaft betrifft die in ihr formulierten Gesetzmäßigkeiten. Mit ihnen geht allgemein ausgedrückt der Anspruch einher, beobachtbare Phänomene erklären zu können (siehe Charpa, Punkt 3). Eine Formalisierung dieses Anspruchs im Sinne von Wohlgemant heißt zum einen, die Gesetzmäßigkeiten überhaupt wahrheitsfähig, nämlich in Form von Satzformeln oder Satzformen, zu repräsentieren, zum anderen sie in ein Ableitungsverhältnis zu setzen (im Fall Formaler Theorien) bzw. sie in einen Beschreibungs- oder Klassifikations- und/oder Begründungs- oder Ableitungszusammenhang zu „intersubjektiv prüfbaren, faktischen

Aussagen zu setzen“ (a.a.O.) (im Fall empirischer Theorien). Bei den „faktischen Aussagen“ handelt es sich um eine propositionale Repräsentation von Meßdaten (siehe Charpa, Punkt 2). Daten stellen somit einen wichtigen Bestandteil wissenschaftlichen Wissens dar, nämlich dann, wenn sie im Rahmen einer Theorie erklärt werden. Darüber, ob dieses *deduktiv nomologische* Verständnis, gemäß dem die Erklärung von Phänomenen vollständig durch die logische Ableitung der Beobachtungsdaten aus Gesetzmäßigkeiten und Randbedingungen beschrieben wird, herrscht eine Kontroverse [Kuipers, 2007].

Kritiker werfen ein, daß eine Beschreibung von Daten, die nur in Begriffen von direkt beobachtbaren Größen stattfindet, durchaus ein *Beobachtungsgesetz* darstellt, als solches aber noch keine Erklärung eines Phänomens leistet [Nagel, 1971, S. 81]. So beschreiben die Mendelschen Regeln einen statistischen Zusammenhang bezüglich der Vererbung von Merkmalen, dieser wird dadurch jedoch noch nicht erklärt. Erst die Einführung des Konzeptes des Gens als Träger von Merkmalen sowie eines Mechanismus‘ der Weitergabe und Rekombination ergeben eine Erklärung der Beobachtung [Kuipers, 2007, S. 6f]. Gene sind in Bezug dieses spezifischen Rahmens der Erklärung allerdings Eigenschaften, die nicht beobachtbar sind. Eine fundamentale Einsicht der Wissenschaftstheorie besteht nun darin, daß a) Erklärungen notwendig nicht-beobachtbare Größen involvieren müssen und damit b) Theorien notwendig nicht-beobachtbare Größen einschließen [Kuipers, 2007, S. 1]. Neben der erschwerten Problematik der Überprüfbarkeit einer Theorie ergibt sich damit eine konkrete Anforderung an eine Theorie: Da die nicht-beobachtbaren Größen nicht als grundgegeben vorausgesetzt werden können, müssen sie innerhalb der Theorie selbst spezifiziert – und damit mit einem Gehalt ‚geladen‘ – werden. Praktisch ohne Ausnahmen besitzt jede Theorie damit einen Anteil terminologischer Beschreibungen (siehe Punkt 4) [Nagel, 1971, S. 88f].

Theorien mitsamt ihrer Terminologien und Daten stellen ein zentrales Konzept im Verständnis von Wissenschaft und wissenschaftlichem Wissen dar. Im Begriff der Theorie überschneiden sich die Wissenschaftsverständnisse von Wohlgenannt und Charpa. Möchte man dieses Verständnis historisch verorten, findet man es in wesentlichen Zügen in der Konzeption Poppers [Popper, 1994, S. 26]. Poppers Kriterium der prinzipiellen Falsifizierbarkeit wird vom Aussagensystem-Theorieverständnis erfüllt: Zusätzlich zur Menge von Sätzen und Satzformen ist eine empirische Behauptung formuliert – nämlich der, daß sich alle empirisch gewonnenen Daten der implizit oder explizit angegebenen Domäne aus der Theorie ableiten lassen. (Erst) mit dieser Meta-Behauptung und der geforderten Widerspruchsfreiheit führt eine Messung, die sich nicht mit ihrer Prognose deckt, zu einem Widerspruch und damit zur Falsifikation der Theorie.

Das Kriterium der Falsifizierbarkeit im Zusammenhang mit empirischen Theorien zur Charakterisierung wissenschaftlichen Wissens zieht eine ganze Reihe von klassischen Fragestellungen der Wissenschaftstheorie nach sich. Diese sollen im Folgenden angedeutet werden, denn sie motivieren die komplexe Modellierung wissenschaftlichen Wissens, die im darauffolgenden Abschnitt vorgestellt werden soll.

1. Für *singuläre Hypothesen*, das heißt für alleinstehende Annahmen, läßt sich argumentieren, daß diese prinzipiell nicht falsifizierbar sind. So setzt die Überprüfung einer Hypothese ein Vorverständnis voraus, um mit Beobachtungsdaten in Verbindung gebracht werden zu können. Ohne dieses Vorverständnisses bleibt jede Hypothese unterbestimmt.

Zusammen mit einem Vorverständnis in Form weiterer Annahmen bildet sich ein Holismus. Dieser ist zwar als Ganzes falsifizierbar, jedoch läßt sich in ihm eine Hypothese nicht mehr auf Beobachtungsdaten reduzieren [Duhem, 1954, S. 183f]. Dieses Argument läßt sich von singulären Hypothesen auf Theorien übertragen. Auch Theorien lassen sich nur mit einem Verständnis aus anderen Theorien beurteilen. Erst der aus mehreren Theorien gebildete Holismus erlaubt die Beurteilung und Falsifizierung einer Theorie. Der Beitrag einer Theorie innerhalb eines Holons an einer Falsifikation ist hingegen nie vollständig bestimmbar [Quine, 1980, S. 37f].

2. Beobachtungen müssen nach Popper als Zeugen zugelassen sein, die eine Theorie falsifizieren können. Dem steht der Einwand gegenüber, daß in jede Beobachtung eines Gegenstandes bereits Vorwissen zu diesem Gegenstand einfließt [Hanson, 1965, S. 19]. Ist dieses Vorwissen wiederum Bestandteil der zu überprüfenden Theorie, entsteht bei der Formulierung deren Gehalts ein Begründungsregress. Die Messung speist sich dann aus den Annahmen, welche durch die Messung eigentlich überprüft werden sollen. Mit den unvermeidlichen *nicht-(direkt-)beobachtbaren* Merkmalen besitzt jede Theorie Kraft ihrer selbst *theoriegeladene* Merkmale.

3. Mit der Falsifikation einer Theorie ist diese zwar als Ganzes in Frage gestellt, nicht aber notwendig in allen ihren Bestandteilen. Popper begegnet dieser Beobachtung mit einem Kriterium, welche Art von Änderungen an einer Theorie redlich sind, um auf eine Falsifikation zu reagieren. In dieser Vorstellung von einer Änderung einer Theorie liegt der Widerspruch, daß die betroffene Theorie nach einer Anpassung offenbar eine andere ist als zum Zeitpunkt der Falsifikation, andererseits aber noch als prinzipiell dieselbe gilt. Lakatos löst diesen Widerspruch in zwei konzeptionellen Anpassungen auf: Zum einen stellt er fest, daß Poppers raffinierte Falsifikation in Wirklichkeit eine Eigenschaft einer Reihe von Theorien ist [Lakatos, 1974, S. 115]. Zum anderen expliziert er mit dem ‚harten Kern‘ einen unveränderlichen und identitätsstiftenden Anteil in Reihen von Theorien [Lakatos, 1974, S. 129]. Würde man diese erweiterte Konzeption wieder als Theorie bezeichnen, entstünde der aufgezeigte Widerspruch von Neuem. Eine Konzeption von wissenschaftlichem Wissen, die eine Entwicklung umfaßt, muß, um Aspekte von Dauer und von Wandel beschreiben zu können (Punkt 7 in Charpas Merkmalen), zweischichtig aufgebaut sein. Lakatos benennt dafür zur Abgrenzung von ‚Theorie‘, das Konzept des ‚wissenschaftlichen Forschungsprogramms‘ [Lakatos, 1974, S. 129].

4. Theorien erfahren in Folge einer Falsifikation in der Regel lediglich eine Anpassung von Hilfsbehauptungen. Andererseits gibt es die historisch selteneren Fälle, in denen aus heutiger Sicht ein ganzes Forschungsprogramm als falsifiziert gilt. Lakatos versucht diese Art der *raffinierten* Falsifikation genauer zu explizieren. Er gibt dazu an, unter welchen Umständen auch der harte Kern von einer Falsifikation unausweichlich betroffen ist. Diesem Versuch einer inhaltlichen Rationalisierung der Falsifikation von Forschungsprogrammen hält Kuhn entgegen:

„Wenn jede einzelne Nichtübereinstimmung ein Grund für eine Ablehnung einer Theorie wäre, müßten alle Theorien allezeit abgelehnt werden. Wenn andererseits nur eine schwerwiegende Nichtübereinstimmung eine Theorieablehnung rechtfertigte, brauchten die Anhänger Poppers ein Kriterium der ‚Unwahrscheinlichkeit‘ oder des ‚Grades der Falsifikation‘. Bei der Entwicklung

eines solchen würden sie mit ziemlicher Sicherheit auf das gleiche Geflecht von Schwierigkeiten treffen, in das sich schon die Verfechter der verschiedenen probabilistischen Verifikationstheorien verstrickt haben.“ [Kuhn, 1976, S. 157f]

An die Stelle der Idee einer methodologischen Logik hinter der Wissenschaftsgeschichte setzt Kuhn eine Rationalität auf pragmatischer Ebene. Der Übergang von einer Theorie zu einer anderen spielt sich demnach im Anwachsen des Kreises ihrer Befürworter ab. Dies kommt zudem nicht durch eine Konversion einzelner Wissenschaftler zustande, sondern durch das Aufkeimen einer neuen Sichtweise innerhalb einer neu entstehenden Gemeinschaft. Kuhn zitiert dazu Max Planck:

„Eine neue wissenschaftliche Wahrheit pflegt sich nicht in der Weise durchzusetzen, daß ihre Gegner überzeugt werden und sich als belehrt erklären, sondern vielmehr dadurch, daß die Gegner allmählich aussterben und daß die heranwachsende Generation von vornherein mit der Wahrheit vertraut gemacht ist.“ (nach [Kuhn, 1976, S. 162])

Möchte man wissenschaftliches Wissen charakterisieren, heißt das mit Kuhn, auch Forscher (Charpa, Punkt 1) und deren gemeinsames Bekenntnis zu einer Menge von Grundüberzeugungen (Charpa, Punkt 5) einzubeziehen. Sofern es überhaupt sinnvoll ist, von der Wahrheit wissenschaftlichen Wissens zu sprechen, dann nur unter den Vertretern einer Forschergemeinschaft (Charpa, Punkt 6).

1.3.2 Wissenschaftstheoretischer Strukturalismus

Der wissenschaftstheoretische Strukturalismus ist ein Modell wissenschaftlichen Wissens, das sowohl die Präzision einer mathematisch-logischen Darstellung, als auch die pragmatisch-empirischen Aspekte von Wissenschaft vereinen soll. Als Vorbild für eine exakte Theoriekonzeption diente das Bourbaki-Programm der Mathematik. Diesem liegt der Wunsch zu Grunde, die Theorien der Mathematik mit Hilfe eines mengentheoretischen Strukturbegriffes zu rekonstruieren [Bourbaki, 1974]. Während in der klassischen Theoriekonzeption als Aussagesystem die Sätze einer Theorie der Interpretation innerhalb eines Systems bedürfen, werden in der Bourbaki-Konzeption Theorien allein durch die Spezifikation von Interpretationen repräsentiert. Da das Aussagesystem selbst damit obsolet wird, spricht man in Abgrenzung von Aussagesystemen (*statement view*), von einer *semantischen* Sicht bzw. einem *non statement view*. Beide Formen der Notation einer Theorie – in Form von zu interpretierenden Sätzen wie auch in Form der Spezifikation der Struktur ihrer Modelle – sind prinzipiell ineinander überführbar. Zustimmung findet der *non statement view* vor allem durch seine teils elegantere Schreibweise [Kuipers, 2007, S. 34f]. Während im klassischen *statement view* durch eine Theorie beschrieben wird, was ‚überall‘ innerhalb einer Domäne gilt, wird im *non statement view* beschrieben, was in jeder ‚konkreten‘ Anwendung der Theorie gilt, mit anderen Worten, wann ein System *Modell* einer (genauer, ‚für eine‘) Theorie ist. Die Notation im *non statement view* wird aufgrund der Beschreibung von Modellen als *bottom-up*-Zugang bezeichnet. Da in dieser allgemeinen Fassung weder im *statement view*, noch im *non statement view* Behauptungen über Beobachtungen formuliert werden können, sind diese Wissensmodelle nur für formale,

nicht jedoch für empirische Theorien geeignet. Den unmittelbaren Ausgangspunkt der strukturalistischen Konzeption bildet daher die Arbeit Patrick Suppes' zur Axiomatisierung von empirischen Theorien durch mengentheoretische Prädikate [McKinsey und Suppes, 1953; Suppes, 1957]. Empirische Theorien umfassen laut Suppes, unter Verweis auf das Bourbaki-Programm der Mathematik, nicht nur eine Menge von theoriespezifischen Modellen, sondern eine zweite Menge von empirisch zu gewinnenden Modellen. Mit der Formulierung einer Teilmengenbeziehung zwischen empirischen und theoretischen Modellen gelingt Suppes die Formulierung einer empirischen Behauptung im *non statement view*.

Die Theoriekonzeption Suppes' entspricht in weiten Zügen einer mengentheoretischen Rekonstruktion der Popperschen methodologischen Falsifikation. Begonnen durch J.D. Sneed erfährt dieses modelltheoretische Theorieverständnis eine Reihe von Erweiterungen. Um das Problem der *nicht-beobachtbaren* Begriffe innerhalb der empirischen Behauptung einer Theorie zu umgehen, werden diese in sogenannten *partiellen* Modellen aus der empirischen Behauptung ausgeklammert. Auch dabei handelt es sich um eine modelltheoretische Rekonstruktion, namentlich der Ramsey-Methode zur Tilgung theoriegeladener Begriffe aus der empirischen Behauptung einer Theorie [Sneed, 1971a]. Eine weitere Facette betrifft das Verhältnis zwischen betrachteten Systemen und ihrer Repräsentation: Da ein isoliertes System – selbst unter einer feststehenden Konzeptionalisierung – verschieden feingranular oder in unterschiedlichen Bezugssystemen repräsentiert werden kann, ergeben sich verschiedene Modelle desselben Systems. Mit Hilfe ‚intratheoretischer Brücken‘ lassen sich die ein Gesamtsystem ergebenden Modelle ins Verhältnis setzen und in ihrer Menge jeweils ein System invariant über Granularität und Bezugssystemen repräsentieren.

Hinter den Begriff ‚Theorie‘ versammeln sich von Gebrauch zu Gebrauch verschiedene Verständnisse. Manche davon sind mathematisch-formal orientiert, andere sind primär naturwissenschaftlich empirisch ausgerichtet wieder andere sind soziologisch-pragmatisch bestimmt. Um darauf zurückzuführende Verständnisschwierigkeiten zu vermeiden, werden im Strukturalismus verschiedene Theorieverständnisse durch je eigene Strukturen mit je eigenem Namen expliziert. Die einfachste Deutung einer empirischen Theorie, *das Theorieelement*, ist im wesentlichen ein Tupel aus den bisher genannten Mengen. Darauf aufbauend führen Sneed und W. Balzer das Konzept des Theorienetzes, bestehend aus verschieden stark spezialisierten Theorieelementen ein [Balzer und Sneed, 1977]. Mit dem Konzept eines *Theorie-Holons* wird es möglich, den Gehalt eines Gefüge mehrerer, für die Erklärung eines Phänomens herangezogener Theorien formal zu explizieren und auf die beteiligten Theorien zu projizieren. Durch C.U. Moulines erfolgt parallel zu Ansätzen von D. Mayr und E. Scheibe eine konzeptionelle Erweiterung des Theorieelementes um einen mengentheoretisch notierten Approximationsapparat [Stegmüller, 1986]. In starker Anlehnung an T. Kuhns wissenschaftliche Revolutionen und I. Lakatos' wissenschaftliche Forschungsprogramme erweitert Moulines das Theoriekonzept um pragmatische Aspekte zur Modellierung einer Evolution von Theorien [Moulines, 1979]. Der Name *Strukturalismus* geht auf eine Empfehlung Y. Bar-Hillels zurück, die in den späten 1970er Jahren durch Wolfgang Stegmüller aufgenommen und mit seinen Schriften zur Wissenschaftstheorie populär geworden ist [Moulines, 1996, S. 1]. Das Feld wissenschaftlicher Disziplinen

in denen Theorien strukturalistisch rekonstruiert wurden, erstreckt sich inzwischen von Physik, Chemie und Biologie über Psychologie, Ökonomie und Soziologie bis Linguistik, Literaturwissenschaft und Rechnungswesen [Moulines, 1996, S.1].

1.4 Thesen zu einem vereinheitlichten Wissensbegriff in Wissenschaft und Informatik

Darüber, was Wissen zu Wissen macht, herrschen in den Rekonstruktionen der Informatik und der Wissenschaftstheorie unterschiedliche Auffassungen. In beiden Bereichen haben sich aufgrund unterschiedlicher Ansprüche und Zielstellungen jeweils verschiedene Anforderungen etabliert. Unter den verschiedenen Modellierungen von Wissen innerhalb der Informatik sollen im weiteren Verlauf formale Ontologien als repräsentative Vertreter behandelt werden. Sie sind in allen Bereichen der Informatik anzutreffen (Softwareentwicklung, Datenbanken, KI), sind Basis jedes expliziten Wissensfundus' (Spezifikation), und haben – im Gegensatz zu Daten – einen oft umstrittenen oder ungeklärten Gehalt. Zu dem primären Anspruch einer Repräsentation, das Problemlösen zu ermöglichen, kommen im Zuge der gesellschaftlichen Relevanz der Informatik weitere Ansprüche an Wissen hinzu. Die daraus resultierenden Anforderungen sind, wie bereits angedeutet, nur ungenügend darstellbar. Spätestens mit der schwer zu beantwortbaren Frage, wann eine formale Problemlösung für ein Anwendungsproblem hinreichend ist, fällt dieser Mangel auch auf das primäre Ziel der Problemlösung zurück.

Mit dem wissenschaftstheoretischen Strukturalismus gibt es seitens der Wissenschaftstheorie andererseits eine mehrschichtige Konzeptionalisierung, in der sich verschiedene Anforderungen samt ihrer Beschreibungsbestandteile formal ausdrücken lassen. Der Strukturalismus baut auf einer historischen Auseinandersetzung mit verschiedenen Positionen in Ansprüchen an Wissen und Wissenschaft auf. Unter den Einflüssen von Positionen wie Empirismus, Positivismus, Fallibilismus, Pragmatismus vollzog sich eine Weiterentwicklung eines formalen über einen empirischen hin zu einem pragmatisch-empirischen Wissensbegriff.

Eine solche Weiterentwicklung steht der Informatik mit ihrem primär formalen Verständnis von Wissen noch bevor. Sie geht einher mit einem sich wandelnden Selbstverständnis von einer Formalwissenschaft hin zu einer Strukturwissenschaft [von Weizsäcker, 1971]. Das Vorhaben dieser Arbeit besteht darin, diesen Schritt mit einer Übertragung des strukturalistischen Wissensmodells auf Anwendungsfälle von formalen Ontologien exemplarisch zu demonstrieren. Dieses Vorhaben ist von den folgenden fünf Thesen geleitet:

These 1: Die Logik-basierten Wissensrepräsentationsformalismen lassen sich innerhalb des strukturalistischen Theoriemodells interpretieren.

These 2: Das strukturalistische Framework deckt ein breiteres Spektrum an Wissensformen ab, als das der Wissensrepräsentation.

These 3: Mit wissenschaftstheoretischen Mitteln ist es möglich, ein empirisches ‚Grounding‘ für formal repräsentiertes Wissen zu spezifizieren.

These 4: Die im Strukturalismus formal darstellbare empirische Behauptung einer Theorie erlaubt die Spezifikation der Korrektheit komputationaler Verfahren in der Wissensverarbeitung.

These 5: Die Einbettung in das wissenschaftstheoretische Framework macht die Wissensrepräsentation durch traditionelle Erklärungsmuster der Wissenschaftstheorie erschließbar.

1.5 Aufbau der Arbeit

Der inhaltliche Aufbau der Arbeit folgt einer Einteilung in drei zentrale Aspekte von Wissen: a) Dem (empirischen) Gehalt von Wissen, b) dem Gehalt von Wissen im Kontext weiteren Wissens sowie c) den Gehalt von im Wandel begriffenen Wissens. Da Wissen innerhalb der Informatik mit allen dreien dieser Aspekte beladen ist, werden die fünf Thesen dieser Arbeit im Lichte eines jeden der drei Aspekte betrachtet. Die Ambiguität der in den Thesen vorhandenen Begriffe – nämlich bezüglich der Aspekte a), b) und c) – wird innerhalb der einzelnen Kapitel aufgelöst.

In *Kapitel 2* erfolgt die Rekonstruktion des Wissens in und um formale Ontologien als strukturalistisches Theorieelement. Dafür werden beide Wissensmodelle – das strukturalistische und das beschreibungslogische – zunächst rekapituliert. Die strukturalistische Rekonstruktion erlaubt es, durch die explizite Angabe einer Bezugsrahmens eine falsifizierbare Behauptung über das Verhältnis von ontologischen Axiomen und der durch sie konzeptionalisierten Domäne auszudrücken. Mit dem gewählten Bezugsrahmen innerhalb der Rekonstruktion als Theorieelement existiert – neben anderen – bereits ein mögliches Grounding formaler Ontologien. Beim Entwurf formaler Ontologien steht damit nicht nur ein automatisierbarer Test auf Inkonsistenz zur Verfügung, sondern auch ein Test der empirischen Behauptung. Mit der Anknüpfung an wissenschaftstheoretische Konzepte wird es möglich, prinzipielle Fragen nach der Gültigkeit und dem epistemischen Status formaler Ontologien zu benennen, zu systematisieren und an den vorhandenen philosophischen Diskurs zu knüpfen.

In *Kapitel 3* erfolgt die Rekonstruktion des Wissens in und um formale Ontologien als strukturalistisches Theorie-Holon. In der Informatik liegt mit modularen Ontologien ein Konzept für das Zusammenspiel unabhängiger formaler Ontologien vor. Sowohl bestehende Ansätze, diese zu interpretieren, als auch die strukturalistische Interpretation von Brückengesetzen werden zunächst vorgestellt. Mit den strukturalistischen Begriffen wird sowohl eine Systematisierung der bestehenden Konzepte von Modularität, als auch die Formulierung einer eigenen Semantik demonstriert. Mit der Interpretation modularer Ontologien als Theorie-Holon wird weiterhin gezeigt, unter welchen ontologischen Annahmen die Formulierung einer empirischen Behauptung vernetzter modularer Ontologien überhaupt möglich ist.

In *Kapitel 4* erfolgt die Rekonstruktion des Wissens in und um formale Ontologien als Theorienetz und als Theorieevolution. Dazu werden zunächst bestehende Ansätze zur Formalisierung, Handhabung und Automatisierung von *ontology change* sowie die strukturalistische Konzeption vorgestellt. Letztere beinhaltet sowohl einen Ansatz, der

1 Einleitung

es erlaubt, auf problematische (nicht-monotone) Modifikationen komplett zu verzichten, als auch ein Framework um den Verlauf der (monotonen) Änderungen an einer Theorie zu rekonstruieren. Das evolutionäre Entwicklungsmuster der strukturalistischen Rekonstruktion erlaubt es, Veränderungen an formalen Ontologien in eine verstehbare Form zu bringen. Es zeigt sich, daß der in der Wissenschaftstheorie zur Erklärung von Dauer und Wandel etablierte Begriff des Paradigmas auch in der Wissensrepräsentation sinnvoll anwendbar ist.

In *Kapitel 5* werden die Resultate aus den Kapiteln 2 bis 4 zur Beurteilung der Ausgangsthesen zusammengeführt. Dadurch soll schließlich beurteilt werden, inwieweit die Möglichkeiten der Informationstechnik dem wissenschaftlichen Anspruch an (empirisches) Wissen gerecht werden können.

2 Repräsentationsweisen von Wissen

„The task of the system analyst may indeed be considered to be essentially the same as that of the scientist, in that it involves constructing an abstract mathematical model of a real worlds domain of phenomena.“

(McDermid und Denvir 1991, S. 3)

2.1 Einordnung und Thesen

Zwischen wissenschaftlichen Theorien und informatischen formalen Ontologien besteht ein enger Zusammenhang. Beide stellen generische Repräsentationsformen von Wissen dar. Gemäß einer der Kernthesen dieses Kapitels können formale Ontologien zudem als spezifische Arten von Theorien verstanden werden. Dem entsprechend wird im weiteren Verlauf eine Methodik entwickelt, um beliebige formale Ontologien als Theorien zu interpretieren. Dies schafft zum einen eine Schnittstelle zur Übertragung weitergehender Methoden und Erkenntnisse der Wissenschaftstheorie in die Wissensrepräsentation, zum anderen bringt eine direkte Gegenüberstellung Impulse, wie der gängige Ontologiebegriff derart erweitert werden kann, daß er dem Gesamtphänomen wissenschaftlicher Erkenntnis besser gerecht wird. Dabei muß zunächst festgestellt werden, daß weder ‚formale Ontologie‘, noch ‚Theorie‘ eine einheitliche Bedeutung besitzen. Die Frage, was eine Theorie ist, läßt sich in zwei verschiedenen Dimensionen beantworten. Einerseits handelt es sich um eine ontologische Dimension: Welcher Art von Gegenständen sind Theorien? Sind sie platonische Gegenstände, die unabhängig vom Menschen existieren und von diesem entdeckt werden können, oder lediglich gedankliche Bilder, die sprachlich fixiert wurden? Eng damit verbunden sind epistemische Implikationen über Geltungsprobleme wissenschaftlicher Aussagen im Allgemeinen. Die andere Achse nach dem Wesen wissenschaftlicher Theorien betrifft deren Form, d.h. ihre konzeptionelle Gestalt.

Formale Ontologien der Informatik lassen sich ähnlich systematisieren. Auch hier besteht die metaphysische Frage, ob formale Ontologien in Anlehnung an die philosophische Disziplin beschreiben, was in der Welt *ist*, oder was für unseren Zweck zur Beschreibung der Welt nötig ist. B. Smith nennt diese sich gegenüberstehenden Verständnisweisen *intern* bzw. *extern metaphysisch* [Smith und Welty, 2001]. In der Tradition der modernen Wissenschaftstheorie sollen die metaphysischen Betrachtungen zum Ontologiebegriff den Vorstellungen eines jeden Einzelnen überlassen bleiben. Stattdessen wird der Fokus primär auf die formalen Merkmale gelegt und nur bei Bedarf mit den dahinterliegenden metaphysischen Überzeugungen und Motivationen begründet.

Auch in formaler Hinsicht gibt es weder für Ontologien, noch für Theorien eine allgemein verbindliche Definition. Stattdessen gibt es verschieden stark ausgebaute Kon-

zeptionen, die sich jeweils um einen allgemeinen Kern bewegen. Da spezielle Behauptungen über Theorien und Ontologien jedoch teils stark von den verwendeten Konzeptionen abhängen, geht diese Arbeit zweistufig vor. Im Fall von formalen Ontologien wird zunächst ein *konzeptioneller Kern* betrachtet und die verschiedenen Erweiterungen dann separat behandelt. Auf Seiten wissenschaftlicher Theorien erfolgt die Betrachtung im Rahmen der strukturalistischen Theoriekonzeption. In Ableitung der zentralen fünf Thesen dieser Arbeit bezüglich nicht-vernetzten, statischen Wissens (siehe Seite 22) sollen innerhalb dieses Kapitels die folgenden fünf konkretisierten Thesen gezeigt werden.

These 1’: Formale Ontologien können als strukturalistische Theorieelemente interpretiert werden.

These 2’: Das Wissensmodell des Theorieelementes erlaubt die einheitliche Interpretation weiterer, *empirischer* Aspekte formaler Ontologien.

Theorieelemente zur Interpretation formaler Ontologien eröffnen eine Reihe von Vorteilen:

These 3’: Mit dem Theorieelement läßt sich ein Grounding und ein empirischer Gehalt für formale Ontologien angeben. Damit wird die Spezifikation der empirischen Behauptung formaler Ontologien möglich.

These 4’: Die empirische Behauptung eines Theorieelementes erlaubt die Spezifikation der Korrektheit von Wissen innerhalb formaler Ontologien.

These 5’: Die Interpretation formaler Ontologien im wissenschaftstheoretischen Framework erlaubt die *Erklärung* des Verhältnisses zwischen formalen Ontologien und Wirklichkeit und macht Wissensrepräsentation durch traditionelle Erklärungsmuster der Wissenschaftstheorie erschließbar.

2.2 Der wissenschaftstheoretische Strukturalismus

2.2.1 Das modelltheoretische Theorieverständnis

Der wissenschaftstheoretische Strukturalismus teilt mit allen anderen Strukturalismen die Auffassung, daß sich das Wesen der untersuchten Objekte (hier: Theorien) am Besten in ihren untereinander und innewohnenden Verknüpfungsverhältnissen, also deren *Struktur*, beschreiben läßt. Während sich die *Struktur* einer Theorie im Standardverständnis als äußerst flach erweist – nämlich als Menge von Theoremen –, weist der wissenschaftstheoretische Strukturalismus eine Theorie als eine Struktur über Modelle aus. Unter der Bezeichnung ‚Modell‘ sammeln sich eine Vielzahl unterschiedlicher Verwendungsweisen (für eine Übersicht und Systematierung siehe [Mahr, 2009]). Eine modelltheoretische, *semantische* Theorieauffassung von einer syntaktischen zu unterscheiden, erfordert eine genauere Bestimmung des verwendeten Modellbegriffs. Eine zentrale Unterscheidung bildet die Verwendung eines Modells ‚für etwas‘ (als *Urbild*), im (logisch inversen) Gegensatz zum Modell ‚von etwas‘ (als *Abbild*). Während innerhalb der Informatik das Verständnis von *Modell* als Abbild der Wirklichkeit verbreitet ist (beispielsweise in UML-Diagrammen,

[Mahr, 2009]), sind Modelle im modelltheoretischen, strukturalistischen Sinn Urbilder, abgebildet durch eine Theorie:

„Therefore, instead of saying that certain equations are a model of subatomic or economic phenomena, we propose to say that the subatomic or economic phenomena are models of the theory represented by these equations.“ [Balzer u. a., 1987, S. 2]

Theorien besitzen im modelltheoretischen Verständnis eine Vielzahl von Modellen, indem von Ihnen eine Vielzahl von Einzelphänomenen subsumiert werden. Die Vielfältigkeit der durch eine Theorie T erklärten Phänomene, spiegelt sich in der Verschiedenheit aller Modelle von T wieder. Dennoch haben alle Modelle einer Theorie zwei Eigenschaften gemeinsam: 1) Alle Modelle sind von der selben Struktur. Die jeweils selbe Struktur spiegelt den jeweils gleichen konzeptionellen Rahmen wieder, in dem Phänomene durch eine Theorie abgebildet werden. 2) Außerdem fallen alle Modelle unter die ‚Gesetze‘ der Theorie T , formallogisch gesprochen: es sind Modelle der Theorie T .

Im strukturalistischen modelltheoretischen Verständnis werden Modelle in zwei Rollen unterschieden. 1) *Potentielle Modelle* spiegeln den konzeptionellen Rahmen von T wieder und stellen „die Ontologie der Theorie“ [Moulines, 1994, S. 186] dar. 2) Aktuelle Modelle sind potentielle Modelle, in denen die Gesetzhypothesen einer Theorie erfüllt sind.

Die formale Repräsentation von Modellen im wissenschaftstheoretischen Strukturalismus erfolgt durch Strukturen der Form

$$\langle D_1, \dots, D_k, A_1, \dots, A_m, R_1, \dots, R_n \rangle, \quad (2.1)$$

über Mengen $D_1, \dots, D_k, A_1, \dots, A_m$ und Relationen R_1, \dots, R_n . Im Gegensatz zu den klassischen formallogischen Modellen besitzen strukturalistische Modelle nicht nur *eine* Menge des *Universums des Diskurses*, sondern $k+m$. Die Mengen D_i sind die sogenannten *Basismengen*, durch welche die verschiedenen empirischen Gegenstandsbereiche einer Theorie abgebildet werden. Die Elemente der Mengen D_i zählen auf, was auf die Frage „Was gibt es?“ im Rahmen einer Theorie zur Antwort gegeben wird. Wissenschaftliche Theorien machen in der Regel quantitative Aussagen, die mit Hilfe mathematischer Trägermengen (wie \mathbb{N} oder \mathbb{R}^2) notiert werden. Neben den empirischen Basismengen dürfen strukturalistische Modelle weitere mathematische Domänen, *auxiliary-sets* A_i , beinhalten.

Jedes potentielle Modell repräsentiert ein potentielles, durch eine Theorie erklärtes Phänomen, wenn es a) vom Typ der Theorie ist, also den gleichen strukturellen Aufbau wie die von der Theorie beschriebenen Modelle besitzt, wenn es b) am Phänomen beteiligte Gegenstände durch Elemente der Basismengen D_1, \dots, D_i repräsentiert, und wenn es c) Ausprägungen von Eigenschaften in Relationen R_1, \dots, R_k kodiert. Dynamische Phänomene werden in Modellen für gewöhnlich als *Phasenraum*, also den zeitlichen Verlauf der betrachteten Eigenschaften, repräsentiert. Die Modellierung einer Theorie auf Ebene einzelner Phänomene erlaubt eine feingranulare Beschreibung, die innerhalb der Standardtheoriekonzeption nur schwer umzusetzen ist. Dort – im klassischen *statement view* – wird ein *globales* Modell der Welt konstruiert, während im *non statement view* auf

Grund der Unabhängigkeit der potentiellen Modelle, von einer *lokalen* Theoriekonzeption gesprochen wird [Bartelborth, 1996].

Die potentiellen Modelle einer Theorie im *non statement view* entsprechen in etwa der interpretierten Sprache einer Theorie im *statement view*. Im Gegensatz zu einer Sprache umfassen potentielle Modelle nur atomare Symbole. Komplexe Verbindungen, die mittels Konstruktoren aus elementaren Größen zusammensetzbar sind, sind zwar Bestandteil der Sprache einer Theorie, nicht aber der Struktur potentieller Modelle. Betrachtet man im *statement view* Wörter zur Formulierung von Aussagen als Koordinaten in einem Sprachraum, läßt sich der Übergang zum *non statement view* mit dem Übergang in eine *koordinatenfreie Formulierung* betrachten [van Fraassen, 1991]. Eine Relativierung auf ein bestimmtes Bezugssystem kann dadurch vermieden werden.

2.2.2 Das Theorieelement

Die strukturalistische Theorieauffassung mit ihren potentiellen Modellen M_p und aktuellen Modellen M läßt als Projektion einer Theorie T im *statement view* auf Mengenverhältnisse betrachten. Die potentiellen Modelle repräsentieren eine Menge L von Sätzen – die Sprache einer Theorie –, die *aktualen* Modelle repräsentieren eine besondere Auswahl T von Sätzen einer Sprache L – die Theoreme einer Theorie – (siehe Abbildung 2.1).

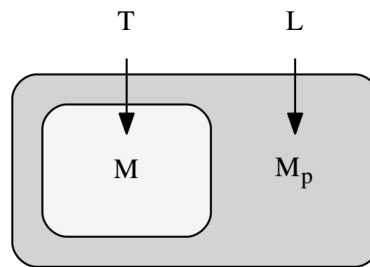


Abbildung 2.1: Übergang von Sprache L und Theorie T zu Modellmengen M_p und M .

In jeder Lehrbuchdarstellung einer empirischen Theorie werden neben den einschlägigen Axiomen weitere nicht-formale Charakterisierungen gemacht, ohne die die Theorie in ihrer Darstellung wesentlich unvollständig bliebe. Im Sinne des *non statement views* werden in der strukturalistischen Theorieauffassung, neben der Charakterisierung einer Theorie durch potentielle und aktuelle Modelle, weitere Mengen zur Repräsentation der in der Regel nicht formalisierten Anteile eingeführt. Auf der Grundlage von Modellen stellt das *Theorieelement* die nächsthöhere Strukturebene für die Beschreibung wissenschaftlicher Theorien dar. Versteht man eine empirische Theorie als prinzipiell empirisch falsifizierbares Wissen, stellt das Theorieelement innerhalb des Strukturalismus' die kleinste Struktur zur Darstellung einer empirischen Theorie dar.

Definition 2.1. Ein Tupel

$$T = \langle M_p(T), M_{pp}(T), M(T), C(T), L(T), I(T) \rangle$$

heißt *Theorieelement* gdw.

1. $M_p(T)$ ist eine Klasse von *potentiellen Modellen*,
2. $M(T)$ ist eine Klasse von *aktualen Modellen* aus $M_p(T)$,
3. $M_{pp}(T)$ ist eine Klasse *partieller Modelle*, der Projektion potentieller $M_p(T)$ auf ihre empirischen Anteile,
4. $C(T)$ ist eine Klasse von *Constraints* von T
5. $L(T)$ ist eine Klasse *von Links* von T .
6. $I(T)$ ist eine Klasse *intendierter Anwendungen (intendierter Modelle)* von T . [Balzer u. a., 1987, S. 39,79]

Das Tupel $K = \langle M_p(T), M_{pp}(T), M(T), GC(T), GL(T) \rangle$ heißt *Kern* des Theorieelements T [Balzer u. a., 1987, S. 39].

Potentielle Modelle

In einem Theorieelement T repräsentiert die Menge $M_p(T)$ potentieller Modelle den konzeptionellen Rahmen, in dem der Kern von T auf die vorgesehenen Phänomene angewendet werden soll. Der konzeptionelle Rahmen eines Theorieelements T spiegelt sich in der Struktur dessen potentieller Modelle $M_p(T)$ wieder. Die Struktur potentieller Modelle ist als Spezifikation des konzeptionellen Rahmens identitätsstiftend für eine Theorie: Änderungen an der Struktur potentieller Modelle – z.B. durch Hinzunahme neuer Eigenschaften – führen nicht zu einer veränderten, sondern zu einer neuen Theorie. Die Spezifikation der Struktur potentieller Modelle einer Theorie ist deren *Typ*.

Definition 2.2. Eine mengentheoretische Aussage A heißt *Typifizierung* gdw. es einen k -Typen σ gibt, so daß A die Form $\langle R \in \sigma(D_1, \dots, D_k) \rangle$ hat, wobei R, D_1, \dots, D_k Symbole für Mengen sind [Balzer u. a., 1987, S. 8].

Beispiel 2.1. Der mengentheoretische Satz $\mathbb{N} \in \mathbf{P}(\mathbb{Z})$ (kurz: $\mathbb{N} \subseteq \mathbb{Z}$) ist eine Typifizierung über den Mengensymbolen \mathbb{N} und \mathbb{Z} . $\mathbf{P}(X)$ bezeichne die Potenzmenge von X .

Beispiel 2.2. Der mengentheoretische Satz $S \in \mathbf{P}(\mathbb{R} \times \mathbb{R} \times \mathbb{R})$ (kurz: $S \subseteq \mathbb{R}^3$) zur Deklaration einer Teilmenge des dreidimensionalen, stetigen Raums, ist eine Typifizierung über den Mengensymbolen S und \mathbb{R} . Die konkrete Belegung von S wird durch die Typifizierung nicht festgelegt, der mengentheoretische k -Typ von S wird jedoch in ein festes Verhältnis zu \mathbb{R} gesetzt.

Beispiel 2.3. Der mengentheoretische Satz $t \in \mathbf{P}(T \times S)$ (kurz: $t : T \rightarrow S$) zur Deklaration einer Trajektorie t im \mathbb{R}^3 ist eine Typifizierung über den Mengensymbolen t, T und S .

Die Definition der k -Typen stellt eine syntaktische Konstruktionsvorschrift für *Ausdrücke* mit Mengensymbolen dar. Die Grundterme dieser Typengrammatik sind Indizes zwischen 1 und k :

Definition 2.3. Für jedes $k \in \mathbb{N}$ sind k -Typen (*k-types*) induktiv definiert durch:

1. für jedes $i \leq k$ ist i ein k -Typ.
2. ist σ ein k -Typ, so auch $\mathbf{P}(\sigma)$
3. sind σ_1 und σ_2 k -Typen, ist auch $(\sigma_1 \times \sigma_2)$ ein k -Typ. [Balzer u. a., 1987, S. 8]

Beispiel 2.4. Die Typifizierung von \mathbb{N} im Beispiel 2.1 basiert auf dem 1-Typen $\sigma = P(1)$, die Typifizierung im Beispiel 2.2 basiert auf einem 1-Typen $\sigma = \mathbf{P}((1 \times (1 \times 1)))$, die Typifizierung in Beispiel 2.3 basiert auf einem 2-Typen $\sigma = \mathbf{P}(1 \times 2)$.

Die Bourbaki-Gruppe prägte für eine, gemäß eines k -Typen über Basismengen D_1, \dots, D_k gebildete Menge den Begriff der *Leitermenge* [Bourbaki, 1974]. Zur Beschreibung der Struktur $\langle D_1, \dots, D_i; A_1, \dots, A_j; R_1, \dots, R_k \rangle$ der potentiellen Modelle $m_p \in M_p(T)$ eines Theorieelements T genügt ein *Typ* $\langle i, j, \sigma_1, \dots, \sigma_k \rangle$, wobei i die Anzahl von Basisdomänen D_1, \dots, D_i der m_p , j die Anzahl von Hilfsdomänen A_1, \dots, A_j und die $\sigma_1, \dots, \sigma_k$ $i + j$ -Typen zur Beschreibung der Signatur der Relationen R_1, \dots, R_k über D_1, \dots, D_i und A_1, \dots, A_j in m_p sind:

Definition 2.4. τ heißt *Typ* gdw. $k, m; \sigma_1, \dots, \sigma_n$ existieren, so daß

1. $\tau = \langle k, m, \sigma_1, \dots, \sigma_n \rangle$.
2. k, m sind natürliche Zahlen ($m \geq 0$).
3. $\sigma_1, \dots, \sigma_n$ sind $(k + m)$ -Typen. [Balzer u. a., 1987, S. 9]

Beispiel 2.5. Die algebraische Struktur eines Ringes $\langle R, +, \cdot \rangle$ Ein Ring umfaßt eine Basismenge R (die auch empirisch sein kann), keine Hilfsmengen, und zwei zweistelligen Relationen über R . Ringe sind vom Typen $\tau = \langle 1, 0, \langle \mathbf{P}(1 \times 1), \langle \mathbf{P}(1 \times 1) \rangle \rangle$.

Aktuale Modelle

Im *statement view* werden die Gesetzmäßigkeiten innerhalb eines Gegenstandsbereichs durch Axiome formuliert. Im *non statement view* des Strukturalismus' beinhaltet die Theorie anstatt einer Menge von Axiomen die korrespondierende Menge M *aktueller Modelle*. Sie umfaßt all jene potentiellen Modelle passenden Typs, in welchen den behaupteten Axiomen entsprochen wird. Da durch sie eine Auswahl bestimmter Modelle aus allen potentiellen Modellen bewirkt wird, gilt

$$M \subseteq M_p.$$

Partielle Potentielle Modelle

Der Problematik theoriegeladener Begriffe wird im Wiener Kreis durch eine Unterteilung der Wissenschaftssprache in zwei Gebiete begegnet: Eine *Beobachtungssprache* besteht allein aus Resultaten von Messvorgängen; eine theoretische Sprache umfaßt Konzepte, deren Bedeutung nicht allein in Messungen besteht (siehe zum Beispiel [Carnap, 1960]). Ist die Gültigkeit von Beobachtungssätzen noch unmittelbar einsichtig, oder wenigstens

allgemeine Konvention, fällt die Formulierung eines Gültigkeitskriteriums für Sätze über theoretischen Größe schwerer. Einerseits liegt die Stärke einer Theorie gerade in der Wahl fruchtbarer theoretischer Begriffe [Duhem, 1954], andererseits fällt es schwer, Begriffe, deren Gehalt sich nur indirekt beobachten bzw. messen läßt, objektiv in eine Beurteilung von Sätzen einfließen zu lassen. Für den logischen Empiristen stellt sich daher die Frage nach einem *Sinnkriterium* für theoretische Begriffe [Quine, 1980]. Eine empirische Beurteilung theoretischer Begriff scheidet aus, da zu ihrer Beobachtung Annahmen der Theorie bereits miteinfließen. Die Formulierung eines Sinnkriteriums führt damit in einen unendlichen Regreß.

Alternativ alle Sätze, die theoretische Größen enthalten, samt den sie enthaltenen Axiomen unbeachtet zu lassen, wäre eine zu große Schwächung der Behauptung einer Theorie [Hempel, 1958]. Carnap fand stattdessen, inspiriert durch Arbeiten von F.P. Ramsey eine andere Lösung: Die Theorie wird zur empirischen Beurteilung zunächst transformiert, indem alle theoretischen Begriffe durch Existenz-quantifizierte Variablen ersetzt werden. Ähnlich einer Skolemisierung wird die Theorie dadurch zwar schwächer, jedoch nur um implizite Forderungen an theoretische Begriffe. Die resultierende Theorie wird *Ramsey-* oder *Ramsey-Carnap-Satz* genannt [Psillos, 2000].

Sneeds Vorhaben zur Entwicklung einer verbesserten Theoriekonzeption beruht auf der Idee, den Ramsey-Satz auf P. Suppes' *non statement view* in einen *,emended Ramsey view'* zu übertragen [Sneed, 1971b]. Es läßt sich einwenden, daß letztlich jede Beobachtung bzw. Messung theoriegeladen ist, weshalb Sneed [1971a] zwei Verbesserungen vornahm: Zum einen den Übergang von der Unterscheidung Beobachtungssprache versus theoretische Sprache hin zu *nicht-theoretischer versus theoretischer* Sprache, zum anderen die Relativierung auf die aktuelle Theorie T und damit die Achse T -*nicht-theoretisch* versus T -*theoretisch*. T -theoretische Größen lassen sich nicht definieren, ohne die Annahmen der eigenen Theorie anzunehmen. Ganz unproblematisch ist auch diese Charakterisierung nicht, da sie nicht formalisierbar ist. Es gibt daher eine weitere *meßtheoretische Deutung* von Balzer und Ulises Moulines [1980] sowie eine *definitionstheoretische* von Gähde [1990]. Die strukturalistische Umsetzung erfolgt durch eine Menge M_{pp} *partieller potentieller Modelle*, deren Elemente $m \in M_{pp}$, 'ursprünglich' aus der Menge M_p stammen, die jedoch keine T -theoretischen Relationen besitzen. M_{pp} ist die Menge der auf nicht-theoretische Relationen projizierten Modelle aus M_p . Durch die Beschneidung um einige Relationen R_i und unter Beibehalt der übrigen Relationen werden ein oder mehrere potentielle Modelle auf partiell potentielle Modelle abgebildet. Die durch M_p und M_{pp} eindeutig definierte Abbildung heißt *Restriktionsfunktion* r :

$$r : \begin{array}{ccc} M_p & \rightarrow & M_{pp} \\ \langle D_1, \dots, D_k, & \mapsto & \langle D_1, \dots, D_k \\ A_1, \dots, A_m, & \mapsto & A_1, \dots, A_m, \\ R_1, \dots, R_i, \dots, R_n \rangle & \mapsto & R_1, \dots, R_{i-1}, R_{i+1}, \dots, R_n \rangle. \end{array}$$

Die Restriktionsfunktion r ist die elementweise Anwendung der Abbildung \hat{r} , durch die ganze Mengen $M'_p \subseteq M_p$ potentieller Modelle elementweise auf Modellmengen $M'_{pp} \subseteq M_{pp}$

abgebildet werden:

$$\hat{r} : \begin{array}{ccc} \mathbf{P}(M_p) & \rightarrow & \mathbf{P}(M_{pp}) \\ \{m : m \in M_p\} & \mapsto & \{m' : m = r(m)\} \end{array}$$

Constraints

Constraints, auch als innertheoretische Querverbindungen oder Brückenstrukturen bezeichnet, sind ein Instrument zur Darstellung von Phänomenen ‚zusammengesetzter Systeme‘. Selbst unter einer feststehenden Konzeptionalisierung und einer festen Spezifikation potentieller Modelle lassen sich Phänomene fast ausnahmslos durch verschiedene (nicht isomorphe) potentielle Modelle repräsentieren. Zum einen ergeben unterschiedliche Granularitäten der Repräsentation verschieden große empirische Domänen – je nachdem ob ein Gegenstand als Ganzes, oder als Summe seiner Bestandteile geführt wird. Zum anderen kann die Ausprägung von Messgrößen von einem Bezugssystem abhängen – je nachdem von welchem Standpunkt eine Messung erfolgt. Prominentes Beispiel ist die Geschwindigkeit eines Körpers aus der Perspektive unterschiedlicher Inertialsysteme, etwa einem Mitreisenden Zuggast und einem außenstehenden Betrachter. Da nicht für jedes System ein – bezüglich der Domäne – maximales Modell existiert [Poli, 2015], wird zum einen anstelle eines globalen Modells zur Repräsentation eines Phänomens eine Menge potentieller Modelle geführt. Aufgrund der lokalen Konzeption des *non statement views* sind die verschiedenen zusammengehörigen Modelle zunächst unabhängig. Zum anderen besitzen Objekte, die gleichzeitig in verschiedenen Modellen repräsentiert werden, in der Regel dieselben Eigenschaften. Weiterhin besteht für gewöhnlich eine Additivität von quantitativen Eigenschaften, wenn Objekte im Verbund auftreten. Constraints erlauben die explizite Modellierung von multiplen Theorieanwendungen durch Brückengesetze zwischen Modellen. Die Modellierung als Struktur erfolgt als Aufzählung aller Mengen von Modellen, die in ihrer Gesamtheit potentiell ein zusammengesetztes System beschreiben. Während ein einfaches System durch *ein* Modell eines Theorieelementes repräsentiert wird, wird ein komplexes System durch eine Menge von Modellen beschrieben.

Definition 2.5. (Nach [Balzer u. a., 1987, S. 47]) *C* heißt *Constraint* gdw.:

1. $C \subseteq \mathbf{P}(M_p)$,
2. $\bigwedge_{m \in M_p} \{m\} \in C$ sowie
3. $\emptyset \notin C$ und $C \neq \emptyset$.

Ein Constraint *C* ist eine Menge von ‚zueinander kompatiblen‘ Teilmengen potentieller Modelle. Constraints sind nicht leer und umfassen die leere Teilmenge \emptyset potentieller Modelle nicht. Jedes potentiell Modell *m* bildet ein Einermengen-Constraint $\{m\}$ in *C*.

Links

Zur Bewältigung der ausufernden Komplexität von Erklärungen von Phänomenen gehört es zur modernen naturwissenschaftlichen Strategie, Systeme – bzw. deren Beschreibung –

in einfachere Bestandteile zu zerlegen. Systeme sind zerlegbar, wenn sich das Gesamtphänomen als Zusammenwirken verschiedener eigenständiger Anteile erklären läßt [Simon u. a., 1994, Kap. 7]. So wird die Bewegung eines geladenen Teilchens im elektrischen Feld nicht durch eine monolithische Theorie – etwa elektromagnetischen Partikelmechanik – erklärt, sondern in einem Verbund aus Elektrodynamik und Partikelmechanik [Bartelborth, 1996]. In der strukturalistischen Terminologie heißt eine Menge $\{T_1, \dots, T_n\}$ von Theorieelementen T_1, \dots, T_n *Theorieholon*. Jede Theorie innerhalb eines Holons beschreibt ein Phänomen in Hinblick verschiedener Größen. Ähnlich den intratheoretischen Constraints erfolgt die komplexe Beschreibung von Phänomenen, durch eine Gruppierung von Modellen. Für intertheoretische Verknüpfungen müssen im Gegensatz zu Constraints, verschiedene Arten von potentiellen Modellen zur Beschreibung eines Phänomens angeführt werden. Da die Verwendung fremden Vokabulars innerhalb der beteiligten Theorieelemente deren eigenständige empirische Behauptung zerstören würde, wird der Link \mathcal{L} zwischen den T_i eines Holons nicht als Bestandteil der T_i angegeben. Von den beiden formalen Ausprägungen soll hier der einfachere *abstrakte Link* eingeführt werden, während der *konkrete Link* in Kapitel 3 betrachtet wird.

Definition 2.6. \mathcal{L} heißt *abstrakter Link* von M_p nach M'_p gdw. $L \subseteq M_p \times M'_p$. [Balzer u. a., 1987, S. 61]

Die Wirkung eines Links \mathcal{L} auf ein involviertes Theorieelement T_i und dessen Anteil $L(T_i)$ ist eine Projektion

$$m_i \in L(T_i) \quad \leftrightarrow \quad \forall j \neq i \quad \exists m_j \in M_p(T_j) : \langle m_1, m_2, \dots, m_n \rangle \in \mathcal{L}.$$

Die Menge $L(T_i)$ enthält nur potentielle Modelle, die mit potentiellen Modellen der übrigen Theorien gemeinsam in einen Link eingehen. Damit gilt für alle beteiligten Theorien T_i , $L(T_i) \subseteq M_p(T_i)$.

Intendierte Anwendungen

Ohne die Angabe eines intendierten Anwendungsbereichs, ist keine empirische Theorie formulierbar. Obwohl der Anwendungsbereich einer empirischen Theorie in Lehrbüchern durchaus benannt wird, wird er von der Standardkonzeption wissenschaftlicher Theorien nicht erfaßt. Die Darstellung intendierter Anwendungen einer Theorie durch eine Menge I erfordert die Festlegung von deren Auswahl und Form. Intendierte Anwendungen sollen nicht nur Fälle dokumentieren, in denen sich eine Theorie erfolgreich anwenden ließ, sondern auch eine Prognose erlauben, für welchen weiteren Bereich eine Theorie als anwendbar postuliert wird. In der Entwicklung empirischer Theorien läßt sich beobachten, daß die Menge intendierter Anwendungen atmet, oder im besten Fall monoton wächst [Diederich, 1996]. Der Anwendungsbereich einer Theorie beschreibt andererseits deren *Paradigma* [Kuhn, 1993] und stellt ein konstitutives und unveränderliches Merkmal einer Theorie dar. Von der Menge I intendierter Anwendungen wird daher mitunter eine Menge $I_o \subseteq I$ *paradigmatischer Beispiele* ausgezeichnet, die als unveränderlich gilt und die von einer Immunisierung ausgeschlossen ist. Da eine Theorie sich auch für Phänomene anwendbar erweisen kann, die zum Zeitpunkt ihrer Notation nicht bedacht wurden,

wird die Menge I als ‚prinzipiell offen‘ verstanden: Anwendungen, die nicht als Teil von I geführt werden, können dennoch (prinzipiell) zu den Anwendungen der Theorie gehören. Die Menge I ist in diesem Verständnis eine Momentaufnahme von bestätigten und lediglich angenommenen Anwendungen einer Theorie und kann sowohl um weitere intendierte Anwendungen anwachsen, als auch Elemente verlieren.

Die Darstellung der intendierten Anwendungen erfolgt in zwei Stufen. Klassen von Anwendungen können in einer ersten Näherung natürlich-sprachlich ausgezeichnet werden. Im Fall der klassischen Partikelmechanik (KPM) lassen sich die intendierten Anwendungen $I(KPM)$ charakterisieren als $I(KPM) = \{\text{Planetensysteme, schiefe Würfe, zusammenstoßene Partikel (Billardbälle), Pendel, \dots}\}$ [Bartelborth, 1996, S. 284].

In extensionaler Darstellung sind die intendierten Anwendungen partielle potentielle Modelle ($I \subseteq M_{pp}$). Im Gegensatz zu potentiellen Modellen sind T-theoretische Terme also kein Anteil intendierter Anwendungen. Eine konkrete intendierte Anwendung $i \in I$ läßt sich sowohl aus einem potentiellen Modell m_p konstruieren ($i = r(m_p)$), als auch durch Messung an einem System, auf das eine Theorie angewendet wird. Zur Vermeidung der mehrdeutigen Verwendung des Begriffs intendierter Anwendungen nennt Kuipers [2007] Systeme in ihrer natürlich-sprachlichen Kennzeichnung ‚Domäne‘ einer Theorie. Bei Balzer [1997] heißen durch Messung gewonnene Modelle ‚Daten‘.

Die Empirische Behauptung

Nachdem eine Theorie spezifiziert worden ist, muß – wenn sie kein rein formales Gebilde bleiben soll – erklärt werden, worin ihre Behauptung besteht. Es leuchtet ein, daß sie einen Zusammenhang zwischen dem erklärten Anwendungsbereich und den Gesetzhypothesen herstellen muß. Diese Behauptung kann aus logischen Gründen nicht innerhalb einer Theorie angegeben werden. Um Antinomien wie ‚Diese Theorie ist falsch‘ zu vermeiden, dürfen Gesetzhypothesen nicht selbstreferenziell sein). Die Formulierung der empirischen Behauptung einer Theorie wird so zur Aufgabe der Wissenschaftstheorie. Als ein Versuch der Spezifikation der empirischen Behauptung im *statement view* kann das deduktiv nomologische Modell [Hempel und Oppenheim, 1948] gedeutet werden. Danach müssen sich die Beobachtungen, als das *Explanandum* E , in der Anwendungsdomäne einer Theorie logisch aus den Gesetzen \mathbf{L} und Randbedingungen \mathbf{C} der Anwendung folgern lassen:

$$\mathbf{L}, \mathbf{C} \models E$$

Im *non statement view* entsprechen die Gesetze \mathbf{L} in etwa den aktuellen Modellen M , die Randbedingungen \mathbf{C} den potentiellen Modellen M_p und das Explanandum E einem intendierten Modell der Menge I . Da $M \subseteq M_p$ gilt, kann man aus dem Hempel-Oppenheim-Schema direkt die Behauptung einer Theorie im *non statement view* herauslesen:

$$I \subseteq M. \quad (2.2)$$

Das Theorieelement des Strukturalismus’ deckt mehr Facetten einer Theorie ab, als die üblichen Axiome und die intendierten Anwendungen. Die zusätzlichen Dimensionen eines Theorieelementes sind weitgehend orthogonal (unabhängig) zueinander angelegt. Bis auf die Basismenge M_p wirken sich Änderungen an einer Facette nicht auf die üb-

rigen Facetten, das heißt deren Umfang an Modellen, aus. Für die Formulierung der empirischen Behauptung einer Theorie müssen daher alle Dimensionen eines Theorieelements zusammengeführt werden. Ausgangspunkt dafür ist die Suppes'sche empirische Behauptung (Formel 2.2). Die initiale Motivation von Sneed [1971a], die Übertragung des Ramsey-Satzes auf den *non statement view*, ergibt die empirische Behauptung $I \subseteq r(M)$. Da neben den aktuellen Modellen auch der Link zu anderen Theorieelementen in die empirische Behauptung einfließen soll, ergibt sich $I \subseteq r(M \cap L)$. Um auch die über Potenzmengen potentieller Modelle definierten Constraints in die empirische Behauptung einfließen zu lassen, bedarf die bisher entwickelte Variante einer Anhebung auf Potenzmengen, $I \in r(\mathbf{P}(M) \cap \mathbf{P}(L))$. Unter Hinzunahme der Menge der Constraints ergibt sich die vollständige strukturalistische empirische Behauptung eines Theorieelementes:

$$I \in r(\mathbf{P}(M) \cap C \cap \mathbf{P}(L)). \quad (2.3)$$

2.2.3 Beispiel: Das Theorieelement der klassischen Partikelmechanik

Die klassische Partikelmechanik (KPM) beschreibt die Dynamik von Körpern im Raum. In einer wesentlichen Vereinfachung wird die Masse der betrachteten Körper in einem Punkt konzentriert angeschaut und als *Partikel* bezeichnet. Genau genommen handelt es sich bei der KPM um eine Vielzahl mitunter inkommensurabler Spezialtheorien, welche unter einem gemeinsamen Namen zusammengefaßt werden. Bereits die Sprechweise von KPM als *eine* Theorie zieht eine Reihe typischer begrifflicher Unwägsumkeiten mit sich und wird im Strukturalismus daher zu Gunsten von ‚Theorienetz‘ (siehe Kapitel 4) aufgegeben. Alle Spezialisierungen innerhalb der KPM besitzen einen gemeinsamen Kern, das erste und zweite Newtonsche Gesetz: ‚Kraft ist gleich Masse mal Beschleunigung‘. Die auf ein Partikel wirkende Kraft ist die Summer aller auf ein Partikel wirkenden Kräfte und die Beschleunigung eines Teilchens ist die zweite Ableitung seiner Position nach der Zeit.

Eine so allgemeine Formulierung der KPM ist in hohem Maße unvollständig und setzt eine Reihe von impliziten Annahmen voraus, deren Auswirkungen auf Aussagen über den empirischen Gehalt einer Theorie erst explizit gemacht werden müssen. Bevor Gesetzhypothesen über den Zusammenhang zwischen den Größen einer Theorie getätigt werden, ist es nötig, das Theorievokabular genauer zu spezifizieren. Im Fall der KPM handelt es sich um die Terme *Kraft*, *Masse*, *Ort*, *Zeit* und *Partikel*. Die ‚Ontologie‘ der KPM spezifiziert unter anderem, daß allen Partikeln die Eigenschaft Masse (repräsentiert durch reelle Zahlen) zukommt und der Ortsraum dreidimensional (reelwertig) ist. Weiterhin ist es notwendig anzugeben, welche realen Systeme durch die KPM beschrieben werden sollen, nämlich zum Beispiel Planetensysteme, schiefe Würfe, zusammenstoßende Partikel oder Pendel.

Die formale Definition des fundamentalen Theorieelementes der KPM erfolgt durch die Definition der Mengen M_p , M , M_{pp} , C , L , und I . Die hier getroffene Darstellung orientiert sich an Bartelborth [Bartelborth, 1996].

Definition 2.7. x ist ein *potentielles Modell* der KPM ($x \in M_p(KPM)$) gdw.:

1. $x = \langle P, T, S, Z, s, m, f \rangle$.
2. P ist eine nichtleere Partikelmenge.
3. T modelliert die Zeitskala durch ein zusammenhängendes, offenes Intervall in \mathbb{R} .
4. S modelliert den Ortsraum als eine offene, einfach zusammenhängende Teilmenge des \mathbb{R}^3 .
5. Z ist eine Menge physikalischer Konstanten.
6. $s : P \times T \rightarrow S$ ist eine differenzierbare Funktion, die jedem Partikel aus P für jeden Zeitpunkt aus T eine Position aus dem Ortsraum S zuweist.
7. $m : P \rightarrow \mathbb{R}^+$ ordnet jedem Partikel eine (konstante, positiv reellwertige) Masse zu.
8. $f : P \times \{1, \dots, n\} \times T \rightarrow \mathbb{R}^3$ ordnet jedem Partikel aus P , zu jedem Zeitpunkt aus T , n verschiedene (dreidimensionale) Kräftevektoren n verschiedener Kräfte zu (beispielsweise Gravitationskräfte, Fliehkkräfte und Reibungskräfte).

Aufbauend auf diesen ontologischen Festlegungen in M_p werden die empirischen Gesetzhypothesen – die Newtonschen Gesetze – in der Menge M spezifiziert:

Definition 2.8. x ist ein (*aktuales*) Modell der KPM ($x \in M(KPM)$) gdw.:

1. $x = \langle P, T, S, s, m, f \rangle$,
2. $x \in M_p(KPM)$ und
3. $\bigwedge_{p \in P} \bigwedge_{t \in T} : m(p) \frac{\partial^2 s}{\partial t^2}(p, t) = \sum_{i \in \mathbb{N}} f(p, i, t)$

So, wie der Rahmen aller möglichen isolierten Theorieanwendungen in der Modellmenge M wiedergespiegelt wird, werden komplexe Theorieanwendungen in Mengen von Modellen aus M wiedergespiegelt. Die Randbedingungen, d.h. die Eigenschaften, die innerhalb einer Teilmenge K aus M gelten müssen, damit K Repräsentant eines komplexen Systems sein kann, werden in der Definition der Menge C angegeben. Im Falle der KPM handelt es sich um das *Identitätsconstraint* C_{id} und das *Extensivitätsconstraint* C_{ex} . Ersteres verlangt, daß ein reales Partikel p eines komplexen Systems innerhalb eines jeden Modells $x \in M_p$, in welchem es jeweils durch p_x repräsentiert wird, dieselbe Masse $m_x(p_x)$ besitzt. Das zweite Constraint verlangt, daß, wenn Partikel, die in einem Modell $x \in M_p$ als ein Partikel $p \oplus p'$ erscheinen, und innerhalb eines anderen Modells $y \in M_p$ als individuelle Partikel p und p' die Massen $m_x(p \oplus p')$ und $m_y(p) + m_y(p')$ gleich sind, sofern von x und y dasselbe System repräsentiert wird (ein additives Massen-Maß). Das Gesamtconstraint beider Ausdrücke ist die Konjunktion beider Bedingungen bzw. der Schnitt beider Modellmengen (siehe [Bartelborth, 1996]).

Definition 2.9.

$$C_{id}(KPM) := \left\{ X \subseteq M_p(KPM) \mid X \neq \emptyset \wedge \bigwedge_{x, y \in X} \bigwedge_{p \in P_x \cap P_y} m_x(p) = m_y(p) \right\}$$

Definition 2.10.

$$C_{\text{ex}}(KPM) := \left\{ X \subseteq M_p(KPM) \mid X \neq \emptyset \wedge \bigwedge_{x \in X} \bigwedge_{y \in X} \bigwedge_{p \oplus p' \in P_x} \bigwedge_{p \in P_y, p' \in P_y} m_x(p \oplus p') = m_y(p) + m_y(p') \right\}$$

Da die Vernetzung von Theorien dezidiert in Kapitel 3 betrachtet wird, soll in diesem Beispiel das KPM-Theorieelement alleinstehend betrachtet werden. Der bezüglich des Gehalts von KPM neutrale Link enthält alle potentiellen Modelle des Theorieelements,

$$L(KPM) = \langle M_p(KPM) \rangle.$$

Beschränkt sich die Beschreibung eines Systems aus Partikeln auf die in der KPM eingeführten Größen Kraft, Ort und Masse, gelten Ort und Masse in der Regel als direkt bestimmbar, während die auf einen Partikel einwirkende Kraft nur indirekt gewonnen werden kann. Da die Bestimmung einer Kraft (im Rahmen der Partikelmechanik) nur mit Hilfe des in $M(KPM)$ definierten Zusammenhangs möglich ist, gilt die Kraft als *theoretische* Größe. Als theoretische Größe wird die Kraft f von den partiellen potentiellen Modellen ausgenommen:

$$M_{pp}(KPM) := \{ \langle P, T, S, s, m \rangle : \langle P, T, S, s, m, f \rangle \in M_p \}.$$

2.3 Wissen als Gegenstand der Künstlichen Intelligenz

Die Debatte darüber, was das Wesen von Wissen im Kontext künstlicher Intelligenz ist, ist so alt wie die Disziplin selbst [McCarthy und Hayes, 1969]. In einer einschlägigen Formulierung wird Wissen solchen Systemen als struktureller Bestandteil zugesprochen, die zu rationalem Agieren fähig sind. Rationalität wiederum bedeutet, Ziele durch das gezielte Ausführen von Aktionen erreichen zu können [Newell u. a., 1972]. Konkreter und doch vorsichtiger werden Newell und Simon, wenn sie Wissen in einer eigenen Sphäre – dem sogenannten *knowledge level* – mit eigenen Zuständen (Wissen) und Gesetzen (Rationalität) verorten [Newell, 1981]. Wissen ist in dieser antireduktionistischen Sichtweise nicht reduzierbar auf die „darunterliegende“ logische Schicht, wohl aber herrscht zwischen diesen ein Verhältnis der *Repräsentation* von Wissen durch Logik. Wenngleich in dieser verbreiteten und philosophisch akkuraten Sprechweise ‚Wissensbasen Wissen repräsentieren‘, soll im weiteren Verlauf die vereinfachende Ingenieurssprechweise von ‚Wissensbasen beinhalten Wissen‘ Verwendung finden (so auch in [Nebel, 1990]). Der Teil einer Wissensbasis, in dem die zugrundeliegende Konzeption der Domäne spezifiziert wird, wird deren *formale Ontologie* genannt. Auf die Frage, was unter Ontologie verstanden wird, haben Guarino und Giaretta [1995, S. 25] sieben oder Arten von Definitionen ausgemacht:

- „1. Ontology as a philosophical discipline.
2. Ontology as a an informal conceptual system.
3. Ontology as a formal semantic account.

4. Ontology as a specification of a ‚conceptualization‘.
5. Ontology as a representation of a conceptual system via a logical theory:
 - 5.1 characterized by specific formal properties or
 - 5.2 characterized only by its specific purposes.
6. Ontology as the vocabulary used by a logical theory.
7. Ontology as a (meta-level) specification of a logical theory. „

Ontologie als philosophische Disziplin (1) ist nicht unmittelbarer Gegenstand dieser Arbeit. Moulines kommt jedoch zu einer bemerkenswerten Charakterisierung des Verhältnisses zwischen der philosophischen Disziplin (1) und den übrigen formalen Ansätzen (2-7):

„Wer bestimmt, was es gibt, ist weder Gott noch die Welt – es ist die Theorie.“ [Moulines, 1994, S. 182]

Moulines’ Diktum steht in engem Zusammenhang zu dem Quines, wonach *sein* heißt, ‚Wert einer gebundenen Variablen zu sein‘ [Quine, 1979]. Die übrigen Charakterisierungen des Ontologiebegriffes fallen in zwei Klassen. Zum einen solche, die Ontologien als Zugang zu einer Konzeptionalisierung (2, 4, 5) betrachten. Hierbei ist die Definition (4) von Gruber [1993b] die wohl populärste und meist zitierte. Doch auch wenn sie eine pointierte Charakterisierung darstellt, bemerkt Smith [2004], daß die Konzeptionalisierung ein nur sehr schwer faßbares Konzept für die Grundlage eines so entscheidenden Begriffes ‚Ontologie‘ ist. Smith’ Vorschlag eines *metaphysischen Realismus*, demgemäß die Realität selbst und unabhängig von theoretischen Betrachtungen des epistemischen Subjektes kategorisiert ist, verschiebt die Schwierigkeit des Zugangs zu einer Konzeptionalisierung auf einen Zugang zur Realität. Moulines [1994, S. 182] führt so ein Bündel von Gründen an, warum er „den metaphysischen Realismus für eine grundsätzlich falsche bzw. unheilbar unverständliche philosophische Lehre“ hält. Daß sich dem Wunsch nach fundierenden Adäquatheitsbedingungen einer Ontologie auch ohne realistische Züge entsprechen läßt, zeigen die übrigen Charakterisierungen von Ontologien als logische Theorien (3, 6, 7). Im modernen, stark positivistisch beeinflussten Naturwissenschaftsverständnis deutet sich an, daß sich die Sinnkriterien einer Theorie auch jenseits von Realismus und Rationalismus verankern lassen. Guarino entwickelt eine frühere Explikationen zur folgenden Definition:

„An ontology is a logical theory accounting for the intended meaning of a formal vocabulary, i.e. its ontological commitment to a particular conceptualization of the world. The intended models of a logical language using such a vocabulary are constrained by its ontological commitment. An ontology indirectly reflects this commitment (and the underlying conceptualization) by approximating these intended models.“ [Guarino, 1998, S.7]

Zur Notation von Ontologien existieren eine Vielzahl von Formalismen. Prinzipiell eignet sich Prädikatenlogik zur Formulierung logischer Theorien. Ableitungen von Begriffsverhältnissen beziehungsweise von logischer Konsequenz lassen sich in vollständiger

	PL	Frames	DL	UML	ER
<i>Begriff</i>	Prädikat	Frame	Konzept	Klasse	Entitätstyp
<i>Relation</i>	Relation	Slot	Rolle	Assoziation	Beziehungstyp
<i>Relation</i>	Relation	Slot	Attribut	–	Attribut
<i>Gegenstand</i>	Term	Frame	Individuum	–	Entität
<i>Restriktion</i>	Axiom	Facette	GCI	OCL	Constraint

Tabelle 2.1: Benennungen der wichtigsten konzeptzentrierten Wissensrepräsentationsformalismen.

Prädikatenlogik (PL1) jedoch weder effektiv noch effizient berechnen. Außerdem erlaubt die Prädikatenlogik eine axiomatische und implizite Definition von Konzepten, die nur schwer lesbar ist. Prädikatenlogik kommt damit zwar als theoretische Grundlage, jedoch nicht zum praktischen Gebrauch in empirischen Anwendung. Stattdessen sind die meisten Wissensrepräsentationsformalismen an *structured inheritance networks* angelehnt [Brachman, 1978]. Diese sind eine Weiterentwicklung der Frame-Konzeption [Minsky, 1974], die sich in frühen konkreten Implementierungen wie KL-ONE [Brachman und Schmolze, 1985] als problematisch erwiesen hat. *Structured inheritance networks*, wie sie in Ontolingua [Chaudhri u. a., 1998], FLogic [Kifer und Lausen, 1989] oder Protege-Frames [Stanford University, 2006] zu finden sind, konkretisieren die teils vage Frames-Semantik in Konzepten der Prädikatenlogik. Zur Wissensrepräsentation im Kontext des Semantic Webs finden hauptsächlich auf Beschreibungslogiken (DL) basierenden Ontologiesprachen wie DAML-OIL [Fensel u. a., 2001] und OWL [Patel-Schneider u. a., 2004] Anwendung. Auch die Gattung der Beschreibungslogiken geht aus *structured inheritance networks* hervor, ist in ihrer expliziten Fokussierung auf Aspekte der Berechnungskomplexität stärker an Logik, und nur noch sehr grundlegend an der Frame-Konzeption orientiert. Beschreibungslogiken lassen sich als Fragmente von Prädikatenlogik darstellen [Baader und Nutt, 2003]. Neben den KR-Formalismen der Wissensrepräsentation gibt es auf spezielle Anwendungen abzielende Modellierungssprachen wie UML-Klassendiagramme [Gómez und Olivé, 2002] innerhalb der Softwareentwicklung oder das Entity-Relationship-Model (ER) [Chen, 1976] innerhalb der Datenbankentwicklung. Über alle Unterschiede der genannten Formalismen hinweg besteht Einigkeit in den grundlegenden Kategorien, in denen Wissen repräsentiert wird. Der gemeinsame Kern der verschiedenen Wissensrepräsentationsontologien [Gómez-Pérez u. a., 2004, S. 47] (Perez) läßt sich als konzeptzentrierte Repräsentation von Terminologien beziehungsweise objektzentrierte Repräsentation von Assertionen beschreiben [MacGregor, 1991a]. Ontologien, die im wesentlichen terminologisches Wissen repräsentieren, werden innerhalb der Informatik konzeptbasiert repräsentiert. Neben den genannten ‚Konzepten‘ existieren eine Reihe weiterer Bausteine der konzept- beziehungsweise objektzentrierten Repräsentation. Relationen dienen zur Beschreibung von Verhältnissen zwischen Klassen (genauer: deren Instanzen), Gegenstände beziehungsweise Individuen oder Objekte stehen für Instanzen von Klassen. Die Verhältnisse zwischen Klassen, Relationen und Individuen werden in Form von Restriktionen repräsentiert. Eine Übersicht über die verschiedenen Grundbegriffe der hier genannten Formalismen findet sich in Tabelle 2.1

Aufgrund ihrer wohldefinierten Semantik und ihrer großen Verbreitung sollen Beschreibungslgik und darauf aufbauende Formalismen im Rahmen dieser Arbeit als repräsentative Vertreter der Wissensrepräsentationsformalismen betrachtet werden. Beschreibungslgische Wissensrepräsentationsformalismen umfassen zwei Bestandteile: (a) eine Beschreibungssprache (Termformalismus) mit der aus atomaren Klassen und Rollen komplexe Klassen und Rollen konstruiert werden können sowie (b) Schemata von Axiomen, mit denen zum einen neue Terme eingeführt und beschrieben werden können (TBox-Axiome), zum anderen solche, mit denen Gegenständen Eigenschaften zugesprochen werden können (ABox-Axiome). Die folgende Skizze einer generischen Darstellung des beschreibungslgischen Zugangs zur Wissensrepräsentation orientiert sich an den Darstellungen in [Nebel, 1990] und [Baader und Nutt, 2003].

2.3.1 Termformalismus

Ein Termformalismus ist eine Vorschrift zur Konstruktion und Interpretation von (komplexen) Termen über einer Menge von atomaren Termen. Als Terme werden zusammenfassend Klassen und Rollen verstanden. Die atomaren Terme, über denen ein Termformalismus definiert ist, setzen sich aus atomaren Klassen und atomaren Rollen zusammen. Über diesen werden mit Hilfe von Klassen- und Rollenkonstruktionen komplexe Klassen (Konzeptbeschreibungen) und komplexe Rollen (Rollenbeschreibungen) gebildet. Diese Termbeschreibungen können teilweise zur Bildung weiterer komplexer Klassen und Rollen verwendet werden. Der Termformalismus \mathcal{AL} umfaßt eine Reihe von syntaktischen Regeln zur Formung von Termen. Sei N_C eine Menge atomarer Konzepte und N_R eine Menge atomarer Rollen. Dann sind die Mengen der Klassen- und Rollenbeschreibungen AL_C AL_R wie folgt definiert.

1. Atomare Terme sind Terme ($N_C \subseteq AL_C$, $N_R \subseteq AL_R$).
2. Ist A eine atomare Klasse ($A \in AL_C$), so ist auch die *atomare Negation* $\neg A$ eine Klasse aus AL_C .
3. Die *universelle Klasse* \top und die *leere Klasse* \perp sind Klassen aus AL_C .
4. Sind C und D Klassen (aus AL_C), so auch deren *Schnitt* $C \sqcap D$.
5. Ist R eine atomare Rolle (aus N_R) und ist C eine Klasse (aus AL_C), so ist die *Wertebeschränkung* $\forall R.C$ eine Konzeptbeschreibung in AL_C .
6. Ist R eine atomare Rolle (aus N_R), so ist die *beschränkte Existenz-Quantifizierung* $\exists R.\top$ eine Termbeschreibung in AL_C .

Aufbauend auf der Sprache \mathcal{AL} mit ihren hier beschriebenen Termkonstruktoren bestehen eine Reihe von Sprachen in Form von \mathcal{AL} -Erweiterungen bzw. Einschränkungen. Diese Sprachen der \mathcal{AL} -Familie sind durch zusätzliche bzw. ausgenommene Termkonstruktoren gekennzeichnet. Eine Übersicht der \mathcal{AL} -Sprachfamilie findet sich in Tabelle 2.2.

Konstruktor	Beschreibung	Sprache			
$C \sqcap D$	Schnitt	\mathcal{FL}_0	\mathcal{FL}^-	\mathcal{AL}	S
$\forall R.C$	Wertebeschränkung				
$\exists R.\top$	Eingeschränkte Existenzquantifizierung				
\top	Universum				
\perp	Leerer Begriff				
$\neg A$	Atomare Negation				
$\neg C$	Negation	\mathcal{C}			
$C \sqcup D$	Vereinigung	\mathcal{U}			
$\exists R.C$	Existenz-Restriktion	\mathcal{E}			
$(\geq nR)(\leq nR)$	Anzahl-Restriktion	\mathcal{N}			
$\{a_1, \dots, a_n\}$	Aufzählung (<i>Nominalien</i>)	\mathcal{O}			
$R \sqsubseteq S$	Rollen-Hierarchie	\mathcal{H}			
R^-	Inverse Rolle	\mathcal{I}			
$(\geq nR.C)(\leq nR.C)$	Qualifizierte Anzahl-Restriktion	\mathcal{Q}			

 Tabelle 2.2: Beschreibungslogische Constructoren der \mathcal{AL} -Sprachfamilie.

Enumerative Klassen (Aufzählungsklassen) werden durch eine Menge von Individuen beschrieben, die zur Klasse gehören. Die Grundmengen, über denen Terme der \mathcal{AL} -Familie gebildet werden, umfassen dann zusätzlich eine Menge von Individuennamen N_I . Ein *Termformalismus über atomaren Termen* N_C und N_R und Namen N_I ist ein fünf-Tupel $\langle N_C, N_R, N_I, AL_C, AL_R \rangle$.

Terme erhalten eine Semantik kraft einer Interpretation. Eine Struktur $\mathcal{I} = (\Delta^{\mathcal{I}}, \cdot^{\mathcal{I}})$ heißt *Interpretation* von Termen der \mathcal{AL} -Familie über atomaren Termen N_C und N_R und Namen N_I gdw. gilt

1. Die Domäne $\Delta^{\mathcal{I}}$ der Interpretation ist nicht leer.
2. Atomare Klassen werden auf Teilmengen der Domäne $\Delta^{\mathcal{I}}$ abgebildet, atomare Rollen auf Teilmengen der Kreuzmenge der Domäne mit sich selbst und Namen auf Elemente der Domäne:

$$\mathcal{I} : \begin{cases} N_C & \rightarrow 2^{\Delta^{\mathcal{I}}} \\ N_R & \rightarrow 2^{\Delta^{\mathcal{I}} \times \Delta^{\mathcal{I}}} \\ N_I & \rightarrow \Delta^{\mathcal{I}} \end{cases} \quad (2.4)$$

3. Für die Interpretation von Konzeptbeschreibungen $C, D \in AL_C$ und einer Rolle

$R \in AL_R$ gelten die folgenden Bedingungen:

$$\begin{aligned}
 (C \sqcap D)^{\mathcal{I}} &= C^{\mathcal{I}} \cap D^{\mathcal{I}} \\
 (\forall R.C)^{\mathcal{I}} &= \{a \in \Delta^{\mathcal{I}} \mid \forall b : (a, b) \in R^{\mathcal{I}} \rightarrow b \in C^{\mathcal{I}}\} \\
 (\exists R)^{\mathcal{I}} &= \{a \in \Delta^{\mathcal{I}} \mid \exists b : (a, b) \in R^{\mathcal{I}}\} \\
 (\exists R.C)^{\mathcal{I}} &= \{a \in \Delta^{\mathcal{I}} \mid \exists b : (a, b) \in R^{\mathcal{I}} \wedge b \in C^{\mathcal{I}}\} \\
 (\top)^{\mathcal{I}} &= \Delta^{\mathcal{I}} \\
 (\perp)^{\mathcal{I}} &= \emptyset \\
 (\neg C)^{\mathcal{I}} &= \Delta^{\mathcal{I}} \setminus C^{\mathcal{I}} \\
 (C \sqcup D)^{\mathcal{I}} &= C^{\mathcal{I}} \cup D^{\mathcal{I}} \\
 (\geq nR)^{\mathcal{I}} &= \{a \in \Delta^{\mathcal{I}} : |\{b : (a, b) \in R^{\mathcal{I}}\}| \geq n\} \\
 (\leq nR)^{\mathcal{I}} &= \{a \in \Delta^{\mathcal{I}} : |\{b : (a, b) \in R^{\mathcal{I}}\}| \leq n\} \\
 \{a_1, \dots, a_n\}^{\mathcal{I}} &= \{a_1^{\mathcal{I}}, \dots, a_n^{\mathcal{I}}\} \\
 (R^-)^{\mathcal{I}} &= (\Delta^{\mathcal{I}} \times \Delta^{\mathcal{I}}) \setminus R^{\mathcal{I}} \\
 (\geq nR.C)^{\mathcal{I}} &= \{a \in \Delta^{\mathcal{I}} : |\{b : (a, b) \in R.C^{\mathcal{I}}\}| \geq n\} \\
 (\leq nR.C)^{\mathcal{I}} &= \{a \in \Delta^{\mathcal{I}} : |\{b : (a, b) \in R.C^{\mathcal{I}}\}| \leq n\}
 \end{aligned} \tag{2.5}$$

2.3.2 Axiome

Beschreibungslogische Wissensbasen umfassen zwei Typen von Axiomen: (a) *Terminologische Axiome* beschreiben das Verhältnis zwischen Termen. (b) *Assertionale Axiome* beschreiben Eigenschaften von Individuen qua ihres Verhältnisses beziehungsweise ihrer Zugehörigkeit zu Termen. Eine Menge von terminologischen Axiomen heißt *Terminologie* (TBox). Eine Menge von assertionalen Axiomen heißt *Weltbeschreibung* (ABox).

Terminologien

Die Verhältnisse zwischen Klassen, die in Terminologien beschrieben werden können, beschränken sich auf das Subkonzeptverhältnis (*sub-concept*), das Untereigenschaftverhältnis (*sub-role*) sowie die Termäquivalenz (*equivalent-concept* und *equivalent-term*). Die Äquivalenz von Klassen läßt sich als Abkürzung für ein wechselseitiges Subkonzeptverhältnis verstehen, die Äquivalenz von Rollen als eine wechselseitige Subeigenschaft.

Definition 2.11. Sind C und D Klassen aus AL_C und sind R und S Rollen aus AL_R , heißen Axiome eine Form

$$\begin{aligned}
 C &\sqsubseteq D \\
 C &\equiv D \quad (C \sqsubseteq D, D \sqsubseteq C) \\
 R &\sqsubseteq S \\
 R &\equiv S \quad (R \sqsubseteq S, S \sqsubseteq R)
 \end{aligned}$$

terminologisch.

Eine Menge azyklischer (nicht direkt oder indirekt selbstbezüglicher) terminologischer Axiome heißt *Terminologie*.

Semantik erhalten terminologische Axiome durch eine Bedingung, wann eine Interpretation \mathcal{I} ein Axiom *erfüllt*:

$$\mathcal{I} \models (C \sqsubseteq D) \leftrightarrow C^{\mathcal{I}} \subseteq D^{\mathcal{I}} \quad (2.6)$$

$$\mathcal{I} \models (R \sqsubseteq S) \leftrightarrow R^{\mathcal{I}} \subseteq S^{\mathcal{I}} \quad (2.7)$$

Eine Interpretation \mathcal{I} erfüllt eine Menge von Axiomen (einer Terminologie), wenn \mathcal{I} jedes Axiom dieser Menge erfüllt. Eine Interpretation \mathcal{I} heißt *Modell eines Axioms*, wenn sie das Axiom erfüllt. Eine Interpretation \mathcal{I} heißt *Modell einer Menge von Axiomen* (einer Terminologie), wenn Sie die Menge der Axiome (die Terminologie) erfüllt. Ein spezieller Typ von terminologischen Axiomen bilden die Termeinführungen. In dieser Spezialform ist die linke Seite des terminologischen Axioms atomar. Termeinführungen dienen der Einführung von Namen in eine Terminologie im Verhältnis zu einem Oberkonzept beziehungsweise einer übergeordneten Rolle. Termeinführungen der Form $A \sqsubseteq \top$ weisen lediglich einen Konzeptnamen A innerhalb der Signatur einer Theorie auf und besitzen in dieser keine semantischen Auswirkungen. Terminologische Axiome, die keine Termeinführungen sind, heißen *Restriktionen*. Eine Terminologie \mathcal{T} setzt sich aus einem Termformalismus $\langle N_C, N_R, N_I, AL_C, AL_R \rangle$, einer Menge I von Termeinführungen sowie einer Menge von Restriktionen R zusammen:

$$\mathcal{T} = \langle N_C, N_R, N_I, AL_C, AL_R, I, R \rangle$$

Mit Hilfe der eingeführten formalen Darstellung, lassen sich bereits verschiedene Typen von Ontologien – charakterisiert nach dem Grad ihrer Formalität nach [Welty u. a., 1999] – darstellen. *Katalog* heißt eine Ontologie ohne Termbeschreibungen ($AL_C = AL_R = \emptyset$), ohne Restriktionen ($R = \emptyset$) und mit Termeinführungen der Form $C \sqsubseteq \top$ für alle $C \in N_C$. *Thesaurus* (ohne Oberbegriffe) heißt eine Ontologie ohne Termbeschreibungen, mit Termeinführungen der Form $C \equiv D$ mit $C \in N_C$, $D \in N_C$ und ohne Restriktionen. *Taxonomien* sind Ontologien mit beliebigen Termeinführungen, jedoch ohne Restriktionen ($R = \emptyset$).

Weltbeschreibung

Innerhalb einer ABox wird der Zustand einer Anwendungsdomäne durch Angabe dessen beschrieben, was der Fall ist. Dafür werden Individuennamen eingeführt und diese vermittlels ihrer Konzept- und Rollenzugehörigkeit ausgezeichnet.

Definition 2.12. Die Axiome

$$C(a), \quad R(a, b)$$

heißten Zugehörigkeit eines Individuums mit Namen a zu einer Klasse C (*Begriffsinstanziierung*, *concept assertion*) beziehungsweise das Verhältnis R von a zu einem Individuum

b (Rolleninstanziierung, *role assertion*). ABox heißt eine Menge von *concept assertions* und *role assertions*.

Die formale Semantik von ABox-Axiomen ist für Interpretationen \mathcal{I} der Form aus Gleichung 2.4 definiert durch:

$$\begin{aligned} C(a)^{\mathcal{I}} &\leftrightarrow a^{\mathcal{I}} \in C^{\mathcal{I}} \\ R(a, b)^{\mathcal{I}} &\leftrightarrow (a^{\mathcal{I}}, b^{\mathcal{I}}) \in R^{\mathcal{I}} \end{aligned}$$

2.3.3 Ontologien

Formale Ontologien beschreiben im Wesentlichen die Bedeutung eines Vokabulars, nicht den Zustand der Welt. Während Terminologien *nicht bevölkert* (*unpopulated*) sind, also keine Individuen(namen) beinhalten, sind Individuen in formalen Ontologien durchaus verbreitet. Eine häufiges Muster repräsentiert Eigenschaften von Klassen (genau genommen, von deren Instanzen) in *reifzierter*, also vergegenständlichter Form. Die rote Farbe des Weines Merlot, wird dann nicht in einer TBox und Abox der naheliegenden Form modelliert,

$$\begin{aligned} \text{wine} &\sqsubseteq \top \\ \text{wineColor} &\sqsubseteq \top \\ \text{redColor} &\sqsubseteq \text{wineColor} \\ \text{whiteColor} &\sqsubseteq \text{wineColor} \\ \text{roseColor} &\sqsubseteq \text{wineColor} \end{aligned}$$

$$\text{redColor}(\text{Merlot}).$$

sondern wie innerhalb der Wine Ontology [Smith u. a., 2004], werden die Farbausprägungen zu Individuen einer enumerativen Klasse. Die Beschreibung eines Weines ist dann mit einer Relation zwischen Weinen und Farbgegenständen möglich. Damit wird – ganz im Sinne der Konzeptzentriertheit – bereits innerhalb der TBox der Zusammenhang zwischen Wein und Farbeigenschaft deutlich:

$$\begin{aligned} \text{wine} &\sqsubseteq \top \\ \text{wineColor} &\equiv \{\text{Red}, \text{White}, \text{Rose}\} \\ \text{hasColor} &\sqsubseteq (\text{wine}, \text{wineColor}) \end{aligned}$$

$$\text{hasColor}(\text{Merlot}, \text{Red})$$

Die Argumentation von Nominalen als terminologisch interpretierte Weltbeschreibung, läßt sich mit bevölkerten Ontologien noch weiter fassen. Obgleich ein Wein wie ‚Longridge-Merlot‘ als Konzept verstanden werden kann, dessen Instanzen konkrete Jahrgänge oder

Abfüllungen oder Flaschen sind, wird er innerhalb der Wine Ontology als Individuum modelliert. ‚LongridgeMerlot‘ läßt sich damit als Reifikation aller Weine mit den per ABox und TBox zugeschriebenen Eigenschaften verstehen. Die ABox wird in bevölkerten Ontologien zum Anteil und zum Träger terminologischen Wissens.

Die bisher aufgeführten Bestandteile zur Notation terminologischen Wissens werden im Weiteren als Explikation von Ontologie (im nicht-verknüpften, nicht-dynamischen Sinn) verstanden:

Definition 2.13. Eine Ontologie \mathcal{O} ist ein 8-Tupel

$$\mathcal{O} = \langle N_C, N_R, N_I, AL_C, AL_R, I, R, A \rangle$$

aus den Mengen N_C , N_R , N_I für Konzept-, Rollen- und Individuennamen, Mengen AL_C , AL_R zur Repräsentation des Termformalismus', einer Menge I von Termeinführungen, einer Menge von R von Restriktionen sowie einer Menge A von ABox-Axiomen. Dieses, an die Sprachfamilie der Beschreibungslogiken angelehnte Ontologieverständnis soll im Weiteren der *konzeptionelle Kern von Ontologien* heißen.

2.4 Strukturalistische Rekonstruktion des Konzeptuellen Kerns

2.4.1 Rekonstruktion formaler Ontologien versus Rekonstruktion Formaler Ontologie

Neben der Wissenschaftstheorie kommt auch der Informatik eine Sonderrolle unter den Wissenschaften zu. Auch sie hat sowohl Wissen und Theorien zum Gegenstand, als auch ihre eigenen Forschungsprogramme samt dem resultierenden Wissen und Theorien. Für die Rekonstruktion der Repräsentation von Wissen ergeben sich somit zwei mögliche Gegenstandsbereiche, nämlich a) Formale Ontologie oder b) Exemplare formaler Ontologien:

a) Ein Gegenstand der Wissensrepräsentation sind formale Ontologien und deren Eigenschaften. Die Grundidee einer strukturalistischen Rekonstruktion dieses Gebietes besteht dann in der Definition eines Prädikates zur Entscheidung, wann eine Struktur eine Theorie über Ontologien ist. Modelle sind in diesem Fokus der Rekonstruktion einzelne Ontologien. Da in der strukturalistischen Rekonstruktion alle Modelle eines Theorieelementes dieselbe Signatur besitzen, besteht der erste Schritt einer Rekonstruktion der Theorie formaler Ontologien im Finden einer gemeinsamen Struktur aller Ontologien. Vorschläge einer solchen Struktur finden sich bereits auf dem Gebiet der Wissensrepräsentation. Nebel [1990, S. 50] definiert die Struktur als Teilmenge eines Termformalismus als ein 6-Tupel aus den folgenden Mengen: 1. Eine Menge atomarer Klassen, 2. eine Menge atomarer Rollen, 3. eine Menge atomarer Terme als Vereinigung von 1. und 2., 4. eine Menge von Klassen (nicht notwendig atomar), 5. eine Menge von Rollen (nicht notwendig atomar) und 6. eine Menge aus Termen als Vereinigung von 4. und 5. Gruber [1993b] versteht unter einer Ontologie ein 5-Tupel aus 1. einer Menge von Klassendefinitionen, 2. einer

Menge von Relationendefinitionen, 3. einer Menge von Funktionendefinitionen, 4. einer Mengen von Instanzendefinitionen, sowie 5. einer Menge von Axiomendefinitionen. Viele weitere, ähnliche Definitionen hängen von der Bestimmung ihres Anwendungszweckes ab [Maedche und Staab, 2002][Heflin und Pan, 2004][Guarino, 1998]. Die Festlegung auf ein adäquates, generisches Modell formaler Ontologien bestimmt die potentiellen Modelle eines Theorieelementes zur Rekonstruktion formaler Ontologien. Neben verschiedenen Konzeptionen formaler Ontologien, besitzt jeder Formalismus zur Wissensrepräsentation verschieden ausdrucksstarke Sprachmittel. Abhängig von der Ausdrucksstärke ergeben sich verschiedene Typen formaler Ontologien. Diese Typen lassen sich in der strukturalistischen Rekonstruktion formaler Ontologien als Struktureigenschaften potentieller Modelle charakterisieren. Die Rekonstruktion eines *Wörterbuches* ergibt ein Theorieelement mit Modellen ohne taxonomische Relationen. Die Rekonstruktion einer Taxonomie ergibt ein Theorieelement aus Modellen mit taxonomischen Verhältnissen, jedoch ohne allgemeine Axiome. Insgesamt ergibt die Rekonstruktion verschiedener beschreibungslogischer Sprachen je nach Ausdrucksstärke, verschieden ausdifferenzierte Theorieelemente. Aufgrund derselben Menge potentieller Modelle (derselben Signatur) über allen Theorieelementen lassen sich diese in Spezialisierungsrelation setzen und als Theorienetz darstellen. Diese Rekonstruktion der Theorie formaler Ontologien ist plausibel und verspricht eine deutliche Kenntlichmachung des Wissens über formale Ontologie als Theorie. Nichtsdestotrotz ist dies nicht die im weiteren Verlauf verfolgte Vorgehensweise. Das strukturalistische Theorieverständnis ist als Reaktion auf Schwierigkeiten mit der Formulierung einer falsifizierbaren Behauptung empirischen Wissens entstanden. Die Theorie Formaler Ontologie ist – so wie sie in Textbüchern beschrieben wird – jedoch nicht empirisch, sondern formal. Ihre Sätze werden formal bewiesen, womit die prinzipielle Falsifizierbarkeit durch ein empirisches Experiment ausgeschlossen ist. Das Werkzeug des Strukturalismus’ erscheint für diesen Fokus der Rekonstruktion zwar geeignet, jedoch auch überqualifiziert.

b) Die stattdessen in dieser Arbeit verfolgte Fokussierung zeigt Ähnlichkeiten mit dem Ontologieverständnis Guarinos:

„An ontology is a logical theory accounting for the intended meaning of a formal vocabulary, i.e. its ontological commitment to a particular conceptualization of the world. The intended models of a logical language using such a vocabulary are constrained by its ontological commitment. An ontology indirectly reflects this commitment (and the underlying conceptualization) by approximating these intended models.“ [Guarino, 1998, S. 7]

An Stelle der Rekonstruktion Formaler Ontologie (als Eigenname und in Großschreibung) soll gezeigt werden, wie sich konkrete formale Ontologien (im Plural) als empirische Theorien verstehen lassen (diese sprachliche Unterscheidung folgt ebenfalls Guarino [1998]). Da der Erkenntnisgewinn der Betrachtung für einzelne Ontologien gering ist, soll die Rekonstruktion stattdessen methodisch und damit allgemein für prinzipiell jede Ontologie erfolgen. Im Gegensatz zum Verständnis Guarinos sollen Ontologien in dieser Arbeit nicht als logische, sondern als *empirische* Theorien aufgefaßt werden. Die Evaluation der Güte von Ontologien gilt als ein zentraler Bestandteil der Ontologieentwicklung. Mit dem Verständnis als Theorien mit empirischen Gehalt wird die empirische Behauptung zum festen Bestandteil der Klassen formaler Ontologien. Die (kleinste) Einheit innerhalb der

strukturalistischen Theoriekonzeption, über welche eine empirische Behauptung formuliert werden kann, ist das Theorieelement. Der Grundstein dieser Arbeit in der Betrachtung formaler Ontologien als Theorie besteht damit in der Rekonstruktion formaler Ontologien als Theorieelement (siehe auch [Schäufli u. a., 2009]).

2.4.2 Rekonstruktion des konzeptuellen Kerns formaler Ontologien als Theorieelement

Gegeben sei eine Ontologie $\mathcal{O} = \langle N_C, N_R, N_I, AL_C, AL_R, I, R, A \rangle$ im Sinn einer Theorie über die Bedeutung eines Vokabulars aus N_C, N_R, N_I . Die Ontologie \mathcal{O} soll im Folgenden als strukturalistisches Theorieelement $T(\mathcal{O})$ rekonstruiert werden. In Anlehnung an die strukturalistische Theoriekonzeption soll die Rekonstruktion in zwei Teilschritten erfolgen.

- 1) Die Sprache der Ontologie wird in Form einer Menge potentieller Modelle des Theorieelementes $T(\mathcal{O})$ beziehungsweise der Form des Typs potentieller Modelle rekonstruiert.
- 2) Die Axiomatik der Ontologie wird als Menge aktueller Modelle rekonstruiert.

Ein Modell für die Sprache einer Ontologie I

Die *Sprache einer Ontologie* $\mathcal{O} = \langle N_C, N_R, N_I, AL_C, AL_R, I, R, A \rangle$ heißen alle Sätze I' , R' und A' (mit $I \subseteq I'$, $R \subseteq R'$, $A \subseteq A'$), die über dem Vokabular von Grundtermen $N_C \cup N_R \cup N_I$ mit dem Termformalismus AL_C, AL_R prinzipiell gebildet werden können. Obwohl die Ontologie \mathcal{O} die Sätze $I \cup R \cup A$ umfaßt, sind diese für die Betrachtung der Sprache von \mathcal{O} nur insoweit relevant, daß von ihnen die Mengen des Termformalismus $\langle N_C, N_R, N_I, AL_C, AL_R \rangle$ aufgespannt werden. Kann dieser Termvorrat der Ontologie \mathcal{O} auch ohne deren aktuelle Axiome $I \cup R \cup A$ bestimmt sein, kann von den tatsächlichen Axiomen $I \cup R \cup A$ von \mathcal{O} ganz abgesehen werden.

Beschreibungslogik besitzt bereits eine wohldefinierte Semantik in Form eines aus der Prädikatenlogik übernommenen Interpretationsbegriffs. Strukturen $\mathcal{I} = (\Delta^{\mathcal{I}}, \cdot^{\mathcal{I}})$ – mit denen alle Sätze der Sprache $I' \cup R' \cup A'$ in die Menge $\{wahr, falsch\}$ abgebildet werden können – heißen Interpretation von \mathcal{O} . Strukturen $\mathcal{I} = (\Delta^{\mathcal{I}}, \cdot^{\mathcal{I}})$, die keine zu \mathcal{O} passende Signatur besitzen, sind keine Interpretationen der Ontologie \mathcal{O} . Da eine Struktur $\mathcal{I} = (\Delta^{\mathcal{I}}, \cdot^{\mathcal{I}})$ genau dann Interpretation der Sprache $I' \cup R' \cup A'$ von \mathcal{O} ist, wenn sie Interpretation des Termformalismus $\langle N_C, N_R, N_I, AL_C, AL_R \rangle$ ist, ist es hinreichend, den Termformalismus der Ontologie \mathcal{O} zu betrachten. Die Erweiterung der Interpretation \mathcal{I} aus der Grundterm-Interpretation (siehe Gleichung 2.5) erfolgt entlang dem rekursiven Schema, mit dem aus atomaren Termen $N_C \cup N_R \cup N_I$ komplexe Termbeschreibungen $AL_C \cup AL_R$ gebildet werden können. Daher ist es bereits hinreichend, die atomaren Terme $N_C \cup N_R \cup N_I$ als (Signatur der) Sprache einer Ontologie zu betrachten. Eine Struktur $\mathcal{I} = (\Delta^{\mathcal{I}}, \cdot^{\mathcal{I}})$ ist somit Interpretation von \mathcal{O} , wenn sie die atomaren Terme $N_C \cup N_R \cup N_I$ interpretiert.

In der strukturalistischen Theoriekonstruktion wird die Sprache einer Theorie durch eine Menge $M_p(T)$ potentieller Modelle des rekonstruierten Theorieelementes T repräsentiert. Die potentiellen Modelle des Theorieelementes $\mathbf{T}(\mathcal{O})$ entsprechen dann direkt der Menge der Interpretationen der atomaren Terme $N_C \cup N_R \cup N_I$ der Ontologie \mathcal{O} . Dennoch unterscheidet sich der Aufbau eines potentiellen Modells $m_p =$

$\langle D_1, \dots, D_i; A_1, \dots, A_j; R_1, \dots, R_k \rangle$ eines Theorieelementes von der Interpretation $\mathcal{I} = (\Delta^{\mathcal{I}}, \cdot^{\mathcal{I}})$ einer beschreibungslogischen Theorie:

1. Theorieelement-Modelle $\langle D_1, \dots, D_i; A_1, \dots, A_j; R_1, \dots, R_k \rangle$ besitzen i empirische Basismengen, dazu j Hilfsbasismengen. Beschreibungslogische Interpretationen besitzen nur eine Basismenge $\Delta^{\mathcal{I}}$, in der alle Typen von Gegenständen (beispielsweise Raum, Zeit, Zahlen, Farben und Personen) kommensuriert werden.
2. Theorieelement-Modelle repräsentieren Extensionen von (Meß-) Größen. Eine Bewertung von Aussagen – also Hypothesen über diese Größen – findet nicht (per Aussage) statt. Beschreibungslogische Interpretationen interpretieren sowohl Terme (als deren Extension) als auch Axiome (in Form von Wahrheitswerten).
3. Theorieelement-Modelle repräsentieren Größen allein durch Extensionen, beschreibungslogische Interpretationen umfassen zusätzlich zu den Extensionen von Termen, deren syntaktisches Urbild (die Definitionsbereich der Interpretationsfunktion). In Worten der Interpretation als Abbildung in der Beschreibungslogik repräsentieren Theorieelement-Modelle nur die Zielmenge(n) dieser Abbildung, nicht jedoch deren Definitionsmenge.
4. Theorieelement-Modelle repräsentieren nur eine geringe Anzahl an Termen $(D_1, \dots, D_i; A_1, \dots, A_j; R_1, \dots, R_k)$. Beschreibungslogische Interpretationen interpretieren neben den atomaren Termen $N_C \cup N_R \cup N_I$ auch alle komplexen Terme und damit in der Regel überabzählbar unendlich viele Termbeschreibungen in AL_C und AL_R .

Beschreibungslogische Interpretationen $\mathcal{I} = (\Delta^{\mathcal{I}}, \cdot^{\mathcal{I}})$ lassen sich gegebenenfalls als potentielle Modelle $m_p = \langle D_1, \dots, D_i; A_1, \dots, A_j; R_1, \dots, R_k \rangle$ rekonstruieren. Für das Aufstellen einer jeden solchen Rekonstruktionsmethodik sind explizit oder implizit verschiedene Designentscheidungen zu fällen:

- *Einheits- vs. differenzierte Basismengen:* Die Domäne $\Delta^{\mathcal{I}}$ einer Interpretation läßt sich als einzige Domäne $D_1 = \Delta^{\mathcal{I}}$ (mit $i = 1$ und $j = 0$) verwenden. Die ontologischen Differenzierungen, die in den Domänen D_1, \dots, D_i und A_1, \dots, A_j der strukturalistischen Konzeption getroffen werden, bleiben dann in einer Gesamtmenge verborgen beziehungsweise müssen aus vorhandenen Klassen entschlüsselt werden. Nachteile einer Vermischung von empirischen Domänen D_1, \dots, D_i und Hilfsdomänen A_1, \dots, A_j sind eine erschwerte spätere Formulierung einer *empirischen* Behauptung einer Ontologie in Abgrenzung von *logischen* Konsistenzbedingungen. Mit einer nicht differenzierenden, einheitlichen Domäne steht außerdem eine für die Interpretation von Übersetzungen zwischen verschiedenen Ontologievokabularen notwendige Information nicht zur Verfügung (siehe Kapitel 3). Sollen hingegen aus einer Interpretation \mathcal{I} differenzierte Basismengen rekonstruiert werden, kann diese Unterscheidung aus \mathcal{I} allein nicht gewonnen werden. Mit einer isolierten Interpretation läßt sich nicht entscheiden, ob beispielsweise Verhältnisse zwischen den Extensionen von Klassen intendiert oder zufällig sind. Stattdessen könnten zur Gewinnung differenzierter Domänen Konzeptdefinitionen herangezogen werden.

- *Konzeptnamen als Basismengen vs. Konzeptnamen als Relationen:* In beschreibungslogischen Interpretationen werden Konzeptnamen N_C als Teilmengen der Domäne $\Delta^{\mathcal{I}}$ interpretiert. Direkt auf potentielle Modelle übertragen würde jede Klasse $C_i \in N_C$ eine Basismenge D_2, \dots, D_{n+1} im Tupel m_p ergeben:

$$m_p = \langle \Delta^{\mathcal{I}}, C_1^{\mathcal{I}}, \dots, C_n^{\mathcal{I}}; \dots \rangle$$

Während eine solche Rekonstruktion formal hinreicht, wird sie der strukturalistischen Konzeption von ontologisch verschiedenen und mindestens notwendigen Grundgrößen D_1, \dots, D_i nicht gerecht: Es gilt: $\bigwedge_i C_i^{\mathcal{I}} \subseteq \Delta^{\mathcal{I}}$. Für eine Ontologie mit zwei Klassen Wein und Rotwein,

$$\begin{array}{lcl} \text{Wein} & \sqsubseteq & \top \\ \text{Rotwein} & \sqsubseteq & \text{Wein} \end{array}$$

würden bei diesem Vorgehen zwei Basismengen *Wein* und *Rotwein* eingeführt. Eine Argumentation für eine Annahme von zwei verschiedenen Arten ist im Angesicht der großen Ähnlichkeit beider Domänen nur schwer zu rechtfertigen. Stattdessen können Klassenextensionen als einstellige Relationen rekonstruiert werden, die über $\Delta^{\mathcal{I}}$ definiert sind.

Für die Rekonstruktion einer Interpretation \mathcal{I} aus einer Ontologie \mathcal{O} als Modell $\langle D_1, \dots, D_i; A_1, \dots, A_j; R_1, \dots, R_k \rangle$ empfiehlt sich ein Verfahren in mehreren Schritten:

Bestimmung der Basismengen D_1, \dots, D_i : In einer Mischform der obigen Entscheidungen wird \mathcal{I} in mehreren Basismengen rekonstruiert. Diejenigen (atomaren) Klassen $C_l \in N_C$, die Kategorien aufspannen, werden als Domänen $D_m \stackrel{\text{df.}}{=} C_l^{\mathcal{I}}$ rekonstruiert.

Definition 2.14. Klassen $C_l \in \{C_1, \dots, C_i\}$ heißen *kategorial* innerhalb einer Ontologie \mathcal{O} gdw.:

1. Alle C_l besitzt nur \top als Oberkonzept:

$$\neg \bigvee_{C \in AL_C \setminus \{C_l, \top\}} C_l \sqsubseteq C$$

2. Alle C_1, \dots, C_i sind paarweise disjunkt:

$$\bigwedge_{p, q \leq i} C_p \sqcap C_q \sqsubseteq \perp,$$

Gelten 1 und 2, kann abkürzend notiert werden:

$$\bigwedge_{p, q \leq i} C_p \sqdot C_q.$$

Alle atomaren Relationen aus N_R sind links- wie rechtsseitig beschränkt auf kategoriale Klassen. Sie bilden nach den Basismengen die zweite Sprosse in der Konstruktion

komplexer Leittermengen.

Die Eigenschaft kategorial zu sein, läßt sich nicht aus einem Modell rekonstruieren, sondern bedarf eines Rückgriffs auf die Axiome der Ontologie \mathcal{O} . Während Eigenschaft 1 aus den Klasseneinführungen abgelesen werden kann, bedarf die Formulierung von Eigenschaft 2 restringierender *disjointnes-Axiome*. Im Fall von Taxonomien – also Ontologien ohne Restriktionen ($R = \emptyset$) – läßt sich Konzept-*Disjointnes* zwar nicht formulieren, kann für die obersten Klassen einer Taxonomie aber sinnvoll zusätzlich angenommen werden. Lassen sich in der Ontologie keine kategorialen Klassen auszeichnen, wird \mathcal{O} durch nur eine universelle Domäne $\Delta^{\mathcal{I}}$ repräsentiert.

Konstanten – beispielsweise Naturkonstanten innerhalb physikalischer Theorien – werden in ihrer strukturalistischen Rekonstruktion üblicherweise in einer eigenen Domäne zusammengefaßt. Dieses Muster ergibt übertragen auf die Rekonstruktion von Individuenkonstanten N_i der Ontologie \mathcal{O} eine zusätzliche, eigene Domäne D_{i+1} . Für jede Rekonstruktion einer Interpretation \mathcal{I} von \mathcal{O} ergibt sich eine Menge von Gegenständen D_{i+1} , die durch die in N_i vergebenen Namen bezeichnet werden. Die Elemente aus D_{i+1} sollten gleichzeitig Elemente einer anderen Basismenge D_1, \dots, D_i angehören.

Bestimmung der Relationen R_1, \dots, R_k und A_1, \dots, A_j : Die Relationen potentieller Modelle setzen sich aus zwei Teilen zusammen: Ein Teil repräsentiert diejenigen atomaren Klassen aus \mathcal{O} , die nicht kategorial sind. Diese werden – da sie keine Basismengen im strukturalistischen Sinn darstellen – als einstellige Relationen über den Basismengen D_1, \dots, D_i rekonstruiert. Den zweiten Teil der Relationen potentieller Modelle aus M_p bilden die atomaren Relationen N_R . Atomare Relationen $R \in N_R$ werden durch Relationen $N_R^{\mathcal{I}}$ über den Basismengen D_1, \dots, D_i repräsentiert. Nicht-atomare Terme ($AL_C \setminus N_c$ und $AL_R \setminus N_R$) werden nicht explizit in potentiellen Modellen des Theorieelements $T(\mathcal{O})$ repräsentiert. Echte (nicht atomare) Termbeschreibungen dienen innerhalb einer Ontologie ausschließlich der Einführung und Restriktion von atomaren Termen. Sie gehören in einer *non statement*-Sichtweise damit zum inhaltlichen, determinierenden, nicht jedoch zum sprachlichen Teil einer Ontologie.

Die Definition der Semantik beschreibungslogischer Ontologien erfolgt in zwei Stufen. Stufe eins umfaßt die Interpretation bzw. Extension von Termen (siehe Gleichung 2.5), Stufe zwei umfaßt die Bewertung von Axiomen – (siehe Gleichungen 2.6 und 2.7). Die Interpretationen von Axiomen werden unterschieden in solche, für die Axiome erfüllt sind (Modelle) und solche, für die Axiome nicht erfüllt sind.

Ein Modell für die Sprache einer Ontologie II

Die bis zu diesem Punkt dargestellte strukturalistische Rekonstruktion der Sprache der Ontologie \mathcal{O} ist eine Übersetzung von Interpretationen \mathcal{I} von \mathcal{O} in Elemente einer Menge $M_p(T)$ potentieller Modelle. Die dargestellte *Methode* der Übersetzung ist eine Abbildung

$$\begin{aligned} \{\mathcal{I} : \mathcal{I} \text{ interpretiert } \mathcal{O}\} &\longrightarrow M_p \\ (\Delta^{\mathcal{I}}, \cdot^{\mathcal{I}}) &\longmapsto \langle D_1, \dots, D_i; A_1, \dots, A_j; R_1, \dots, R_k \rangle \\ &\simeq \text{Rekonstruktion von } (\Delta^{\mathcal{I}}, \cdot^{\mathcal{I}}) \text{ und } \mathcal{O} \end{aligned}$$

und leistet zwei Beiträge:

1) Es wird eine für alle potentiellen Modelle gleiche Struktur $\langle D_1, \dots, D_i; A_1, \dots, A_j; R_1, \dots, R_k \rangle$ beschrieben. Alle potentiellen Modelle $m_p \in M_p$ eines Theorieelements besitzen dieselbe Struktur. Die (invariante) Struktur aller potentiellen Modelle hängt von der Ontologie $\mathcal{O} = \langle N_C, N_R, N_I, AL_C, AL_R, I, R, A \rangle$ ab, nicht jedoch von einzelnen Interpretationen. 2) Weiterhin wird beschrieben, wie sich die konkreten potentielle Modelle $m_p \in M_p$ der gewonnenen Struktur mit Hilfe von Interpretationen befüllen lassen.

Da konkrete potentielle Modelle als Resultat der Rekonstruktion nur schwer handhabbar sind, läßt sich deren Struktur abstrahieren.

Die Sprache $L(\mathcal{O})$ der Ontologie \mathcal{O} wurde bisher als Menge potentieller Modelle M_p eines Theorieelementes T rekonstruiert. Die Menge potentieller Modelle läßt sich als Typ der Strukturen in M_p rekonstruieren. Eine Struktur m_p vom Typ $\langle i, j, \sigma_1, \dots, \sigma_k \rangle$ eignet sich zur Interpretation der Ontologie \mathcal{O} , wenn gilt: 1) i ist die Anzahl kategorialer Klassen in \mathcal{O} . 2a) $j = 1$ – falls nichtkategoriale Klassen als semicharakteristische Funktionen nach der Hilfsmenge $\{1\}$ rekonstruiert werden oder 2b) $j = 0$. 3) $\sigma_1, \dots, \sigma_k$ sind die Signaturen der Relationen und nicht-kategorialen Klassen in \mathcal{O} im Sinne von *Leitermengen* über $D_1, \dots, D_i; A_1, \dots, A_j$.

$$\begin{array}{ccc}
 L(\mathcal{O}) & \xrightarrow{\text{Interpretation}} & \{\mathcal{I} : \mathcal{I} \models L(\mathcal{O})\} \\
 \downarrow \text{Modell II} & & \downarrow \text{Modell I} \\
 \langle i, j, \sigma_1, \dots, \sigma_k \rangle & \xleftarrow{\text{Typifizierung}} & \{\langle D_1, \dots, D_i; A_1, \dots, A_j; R_1, \dots, R_k \rangle\}
 \end{array}$$

Ein Modell für das Commitment einer Ontologie

Axiome spezifizieren neben der syntaktischen Einführung des Vokabulars einer Ontologie deren inhaltliches Commitment. Aus modelltheoretischer Perspektive bewirkt das Commitment einer Ontologie $\mathcal{O} = \langle N_C, N_R, N_I, AL_C, AL_R, I, R, A \rangle$ eine Auswahl der durch ihre Sprache aufgespannten Interpretationen [Guarino, 1998]. Diejenigen Interpretationen \mathcal{M} aller Interpretationen \mathcal{I} , die alle Axiome I, R, A erfüllen, heißen Modelle. In strukturalistischer Sprechweise werden die Axiome einer Theorie als eine Beschränkung der potentiellen Modelle $M_p(T)$ auf die aktuellen Modelle $M(T)$ eines Theorieelementes T rekonstruiert. Die Menge der aktuellen Modelle $M(T)$ des Theorieelements $T(\mathcal{O})$ ist die Teilmenge aus solchen potentiellen Modellen $M_p(T)$, deren Elemente Rekonstruktions-Urbilder bezüglich in der Modellmenge \mathcal{M} der Ontologie \mathcal{O} sind.

$$\begin{array}{ccc}
 \{\mathcal{I} : \mathcal{I} \models L(\mathcal{O})\} & \xrightarrow{\cong} & \{\mathcal{M} : \mathcal{M} \models \mathcal{O}\} \\
 \downarrow \text{Rekonstr.} & & \downarrow \cong \\
 M_p(T) & \xrightarrow{\cong} & M(T)
 \end{array}$$

Die aktuellen Modelle $M(T)$ rekonstruieren den Gehalt der Axiome I, R, A von \mathcal{O} , abzüglich der bereits zur Konstruktion des Typs potentieller Modelle $M_p(T)$ gebrauchten Informationen.

2.4.3 Rekonstruktion von Ontologie-Erweiterungen

Beschreibungslogiken bilden die theoretische Grundlage vieler Wissensrepräsentationsformalismen. Neben den in Tabelle 2.2 dargestellten Sprachmitteln weisen verschiedene Repräsentationsformalismen Erweiterungen dieses konzeptionellen Kerns aus. Auch Wissen, das eine Darstellung durch erweiterte Ausdrucksmittel erfordert, läßt sich in Form eines Theorieelementes rekonstruieren.

Mehrstellige Rollen Rollen sind in klassischen Beschreibungslogiken zweistellige Relationen. Individuen einer Klasse werden damit zu anderen Individuen in Verbindung gesetzt. Innerhalb einer Interpretation \mathcal{I} ist die Extension $R^{\mathcal{I}}$ einer Rolle R Teilmenge der geordneten Paare $\Delta^{\mathcal{I}} \times \Delta^{\mathcal{I}}$ über der Domäne $\Delta^{\mathcal{I}}$ [Baader und Nutt, 2003]. Ausdruckstarke DL-Sprachen wie \mathcal{DLR} [Calvanese u. a., 1997] erlauben Rollen beliebig hoher Stelligkeit $n < n_{max}$. Rollen einer Ontologie lassen sich innerhalb einer Rekonstruktion $T(\mathcal{O})$ mit potentiellen Modellen $m_p \in M_p$ als k -Typen über k Basismengen der m_p -Struktur definieren. In ähnlicher Weise wird für die Darstellung n -stelliger Funktionen (wie in LOOM [MacGregor, 1991b]) verfahren. Diese werden als $(n + 1)$ -stellige Relationen repräsentiert, wobei die Rechtseindeutigkeit als Axiom und damit als Beschränkung für aktuelle Modelle gefordert werden kann.

Konkrete Domänen Die Web Ontology Language (OWL) erlaubt die Verwendung zusätzlicher *konkreter Domänen*. Wird ein Objekt durch eine Rolle mit einem anderen Objekt in Relation gesetzt, darf letzteres außerhalb der im engeren Sinn für eine Ontologie betrachteten Domänen liegen. Konkreten Domänen können verwendet werden, um Objekte mit numerischen, literalen oder anderen nicht-empirischen Attributen zu versehen. [Haarslev und Möller, 2003] Ein ABox-Axiom,

$$\text{has-age}(\text{John}, 29)$$

setzt ein Individuum Namens *John* mit einer natürlichen Zahl in Relation (*has-age*), ohne daß \mathbb{N} Teilmenge von der untersuchten Domäne $\Delta^{\mathcal{I}}$ abhängig ist. Beschreibungslogik-Erweiterungen wie $\mathcal{SHIQ}(\mathcal{D}_n)$ erlauben zur Interpretation von Axiomen der gezeigten Art eine erweiterte Struktur $(\Delta^{\mathcal{I}}, \mathcal{D}_1, \dots, \mathcal{D}_n, \cdot^{\mathcal{I}})$ mit zusätzlichen Domänen \mathcal{D}_1 bis \mathcal{D}_n einschließlich darüber vordefinierten Relationen. Das Konzept zusätzlicher, vornehmlich mathematischer Domänen ähnelt dem der *auxiliary-sets* strukturalistischer Modelle. Eine Möglichkeit zur Rekonstruktion von $\mathcal{SHIQ}(\mathcal{D}_n)$ -Wissensbasen besteht in der direkten Übernahme der \mathcal{D}_1 bis \mathcal{D}_n in die Struktur potentieller Modelle $\langle \mathcal{D}_1, \dots, \mathcal{D}_i; \mathcal{D}_1, \dots, \mathcal{D}_n, A_1, \dots, A_j; R_1, \dots, R_k \rangle$.

Klassenattribute In Ontologien werden Begriffe und Rollen intensional über Eigenschaften definiert, welche die darunter fallenden Individuen besitzen müssen. Auch wenn damit Klassen definiert werden, werden stets Eigenschaften von oder zwischen Objekten adressiert. Zur Verdeutlichung heißen beschreibungslogische Rollen in OWL *object properties*. Die meisten praktischen Ontologieformalismen (so z.B. OWL, LOOM, Ontolingua) erlauben es, auch Klassen und Rollen Eigenschaften zuzuschreiben. Das ,Reden

über Klassen wird in OWL durch eine eingeschränkte Reifikation erlaubt. Reifikation gestattet es, Klassen, Rollen und ganze Ontologien als Objekte zu adressieren und in ABox-Axiomen zu verwenden. Syntaktisch erschöpft sich Reifikation durch Aufnahme der benannten Terme in die Menge der Gegenstandskonstanten, $N_C \cup N_R \subseteq N_i$.

Axiome zur Attribution von Klassen sind in OWL semantisch neutral. Sie haben keinen Einfluß auf die Interpretation einer Ontologie. Ein ABox-Axiom über eine Klasse #3212,

has-name(#3212, "wine")

repräsentiert Information über #3212, diese ist für Anfragen im Sinne des konzeptionellen Kerns einer Wissensbasis jedoch nicht relevant. Die Verwendungsweisen eines Bezeichners als Klasse und als Klassenobjekt haben aufeinander keine Auswirkung.

Attribution von Axiomen Die OWL Sprachvariante OWL-DL läßt sich im Wesentlichen als Notationsweise des in Abschnitt 2.4.2 beschriebenen konzeptionellen Kerns formaler Ontologien plus konkreter Domänen und Klassenattributen beschreiben. Mit OWL-Full liegt eine Erweiterung von OWL-DL vor, in der weitgehende Freiheit in der Formulierung von Axiomen herrscht. Im wesentlichen Unterschied zu beschreibungslogischen Sprachen dürfen Axiome innerhalb einer Ontologie als Gegenstand anderer Axiome verwendet werden [Lassila und Swick, 1999]. Syntaktisch erfordert dies zum einen die Vergabe von Namen für Axiome (*statement identifier*), zum anderen die reifizierte Verwendung eines Axioms als Individuum innerhalb eines ABox-Axioms:

S1 : is-author-of(Scott, Waverley)

S2 : wonders-if(GeorgeIV, S1)

Da die Wahrheit der Aussage S1 nicht von S2 abhängt, bedarf ein Modell zur Attribution von Axiomen keiner Darstellung des Zusammenhangs zwischen S1 und is-author-of(Scott, Waverley). Die Aussage is-author-of(Scott, Waverley) ließe sich in Modellen kodieren und mit dem Gegenstandsnamen S1 verknüpfen; wahrheitswertrelevant ist diese Verknüpfung jedoch nicht. Es reicht daher, in Analogie zum vorausgehenden Absatz, in potentiellen Modellen M_p einer strukturalistischen Rekonstruktion von OWL-Full-Ontologien eine Domäne von Axiomennamen einzuführen.

Modale Erweiterung Für den Bedarf an der Formulierung von Modalitäten über Aussagen (gilt *notwendiger Weise* und gilt *möglicher Weise*) wird von Beginn der ontologischen Disziplin an argumentiert [Aristoteles, 1995]. Der Satz „Fido ist ein brauner Hund“ würde in Form eines beschreibungslogischen ABox-Axioms,

(hund \sqcap braun)(Fido)

vom Satz „Fido ist ein hündisches Braun“ nicht zu unterscheiden sein. Offenbar sind die Begriffe ‚Hund‘ und ‚braun‘ verschiedener Natur, als daß ein gegeneinander Austauschen Eigenschaften verletzt, die den Wortgebrauch jenseits der Kategorie ‚Begriff‘ regeln.

Die im Ausgangssatz implizit transportierten Rollen von *Hund* als *Prädikator* (im Kontext von Datenbanken: Primärschlüssel) versus der des *Brauns* als *Apprädikator* sind prädikatenlogisch nicht differenzierbar. Modale Erweiterungen (siehe [Guarino und Welty, 2000]) der Beschreibungslogik erlauben demgegenüber eine Formalisierung der Art ‚Hunde sind notwendig hündisch‘:

$$\forall x(\text{hund}(x) \rightarrow \Box \text{hund}(x)).$$

Sofern das Prädikat *hund* keine Farbeigenschaft beinhaltet. Im Gegensatz dazu könnte die Proposition

$$(\text{rabe} \sqcap \text{schwarz})(R)$$

durchaus als ‚R ist rabenschwarz‘ gelesen werden, insofern Raben als notwendig schwarz gelten. Eine Unterscheidung zwischen den Sätzen $\forall x(\text{rabc}(x) \rightarrow \Box \text{schwarz}(x))$ und $\forall x(\text{rabe}(x) \rightarrow \text{schwarz}(x))$ beseitigt weiterhin die Ambiguität, ob es sich bei ‚alle Raben sind schwarz‘ um einen terminologischen oder einen empirischen Satz handelt.

Die Sprache der modalen Logik **K** über Propositionen p_1, p_2, \dots ist die kleinste Formelmengende die 1) p_1, p_2, \dots enthält, 2) geschlossen unter den Booleschen Junktoren \wedge, \vee, \neg ist und 3) für jedes ϕ auch $\Box\phi$ und $\Diamond\phi$ enthält. Semantik erhalten modallogische Formeln durch Kripkestrukturen $M = \langle S, \pi, \mathcal{K} \rangle$, wobei S eine Menge von Zuständen (*states*) möglicher Welten ist, π eine Abbildung von elementaren Aussagen p_i in Mengen möglicher Welten, in denen p_i gilt, und \mathcal{K} eine binäre *Zugänglichkeitsrelation* über möglichen Welten S . Eine modale Formel ϕ heißt gültig in einer Welt $s \in S$, in M ($M, s \models \phi$), gdw. (nach [Sattler u. a., 2003, S. 159])

$$\begin{aligned} M, s \models p_i &\iff s \in \pi(p_i) \\ M, s \models \phi_1 \wedge \phi_2 &\iff M, s \models \phi_1 \quad \text{und} \quad M, s \models \phi_2 \\ M, s \models \phi_1 \vee \phi_2 &\iff M, s \models \phi_1 \quad \text{oder} \quad M, s \models \phi_2 \\ M, s \models \neg\phi &\iff M, s \not\models \phi \\ M, s \models \Diamond\phi &\iff \bigvee_{s' \in S} ((s, s') \in \mathcal{K} \quad \text{und} \quad M, s' \models \phi) \\ M, s \models \Box\phi &\iff \bigwedge_{s' \in S} ((s, s') \in \mathcal{K} \rightarrow M, s' \models \phi). \end{aligned}$$

Ist \mathcal{K} eine Äquivalenzrelation, heißt die modale Logik **K**, **S5**.

Sätze der modalen Logik **S5** lassen sich strukturalistisch rekonstruieren. Dazu werden Kripkestrukturen $M = \langle S, \pi, \mathcal{K} \rangle$ in Constraintmengen $c \in C$ eines Theorieelementes T übersetzt:

1. Mögliche Welten sind strukturell und semantisch direkt als potentielle Modelle lesbar. Jedes Modell, wie jede mögliche Welt, beschreibt den Zustand einer Welt als vollständige Belegung aller elementaren Aussagen. Es gilt $S = M_p$.
2. Die Menge $\pi(p_i)$ der möglichen Welten, in denen p_i gilt, ist als mengentheoretische

Charakterisierung $\{m \in M_p : m \models p_i\}$ ausdrücken.

3. Äquivalenzrelationen \mathcal{K} lassen sich als Mengen möglicher Welten $c \subseteq M_p$ darstellen. Jedes \mathcal{K} wird repräsentiert durch ein $c \in \mathbf{P}(M_p)$. Eine Menge $C \subseteq \mathbf{P}(M_p)$ aus \mathcal{K} -repräsentierenden $c \in C$ wird als Menge der *Constraints* eines Theorieelements T repräsentiert.

2.4.4 Rekonstruktion nicht formalisierter Bestandteile

Während für einige der Komponenten eines Theorieelementes eine Entsprechung in Formalismen formaler Ontologien aufgezeigt werden kann, werden diejenigen Facetten eines Theorieelementes, die zur Formulierung *empirischer* Anteile dienen, nicht bedient. Was in empirischen Theorien ein Passungsverhältnis zwischen Theorie und Wirklichkeit darstellt, findet in formalen Ontologien keine Spezifikation. Daß formale Ontologien ein Abbild eines Anwendungsbereiches darstellen, ist andererseits Anteil der einschlägigen Begriffsbestimmungen. Der Fundus an Wissen um eine formale Ontologie umfaßt offenbar mehr Wissen, als in der formalen Ontologie spezifiziert wird. Darin inbegriffen ist solches Wissen, daß es Experten durchaus erlaubt, die Passung einer formalen Ontologie zu beurteilen. Zur Formulierung einer Passungsbehauptung notwendige Wissensfacetten können in einer strukturalistischen Rekonstruktion des Wissens *um eine Ontologie* (im Gegensatz zu *der Ontologie*) erfaßt werden.

Intendierte Anwendungen

Die intendierten Anwendungen eines Theorieelementes repräsentieren die Anwendungsfälle, für welche die Gültigkeit der enthaltenen Hypothesen behauptet werden. Ohne die Angabe von Anwendungsfällen wird die empirische Behauptung einer Theorie trivial, das heißt zur Tautologie. Der Schwierigkeit, einen Zusammenhang zwischen Theorie und Wirklichkeit herzustellen, obwohl beide als kategorial verschieden betrachtet werden [Popper, 1972], begegnen Strukturalisten mit einem zweistufigen Modell [Kuipers, 2007]. Intendierte Anwendungen werden zunächst als Menge „Paradigmatischer Beispiele“ informal angegeben (zum Beispiel Pendelbewegung, elastischer Stoß oder ballistischer Wurf). In einem zweiten Schritt werden Systeme der genannten Anwendung in den Größen einer Theorie als Datenstrukturen $\langle D_1, \dots, D_i; A_1, \dots, A_j; R_1, \dots, R_k \rangle$ verstanden. Da durch die Sprache einer Theorie definierte potentielle Modelle und die durch Messungen an Anwendungssystemen gewonnenen Strukturen vom gleichen Typ sind, läßt sich die empirische Behauptungen einer Theorie schließlich in Form von Mengenverhältnissen ausdrücken.

Die Anwendungen einer Ontologie liegen in ihrer intendierten Verwendung. Die Verwendungsweisen einer Ontologie lassen sich gemäß ihrer verschiedenen Funktionen unterscheiden:

1. Die Verwendung zur Annotation von Daten [Smith u. a., 2007].
2. Die Verwendung zur Normierung eines Sprachgebrauchs [Ashburner u. a., 2000].
3. Die Verwendung im Rahmen anderer Ontologien [Parent und Spaccapietra, 2009].

4. Die Verwendung als Konstruktionsvorlage (zum Beispiel in der Softwareentwicklung, insbesondere im Design von Agentensystemen[Grütter, 2006]).

zu 1) In der Annotation von Daten in Begriffen einer Ontologie können zwei Fälle unterschieden werden. (a) Die Messung (die Datengewinnung) erfolgt in Größen unabhängig von der anzuwendenden Ontologie. Wird beispielsweise photographisch gewonnenes Bildmaterial logisch ausgezeichnet, ist in die Konstruktion der Aufnahmetechnik kaum Wissen um die Klassen einer nachfolgenden Auszeichnung eingegangen. In wissenschaftstheoretischer Sprechweise handelt es sich beim Paar aus Meßdaten und Annotationen um ein im Zusammenhang zu betrachtendes *Holon*. Das Verhältnis von Annotationsontologie auf die Beschreibung der Meßdaten kann dann beispielsweise auf Reduzierbarkeit untersucht werden. Siehe dazu Kapitel 3. (b) Die Daten sind bereits im Schema der Annotationsontologie gewonnen worden. Ein Datenbankschema, in dem Datensätze vorliegen, kann beispielsweise bereits aus der Annotationsontologie hervorgegangen sein. In diesem Fall würde die Passung der vorliegenden Daten mit der Annotationsontologie selbstbezüglich sein. Zum Ausklammern von, in die Datengewinnung einfließender Annahmen aus der Behauptung einer Ontologie siehe Absatz partielle potentielle Modelle.

zu 2) Wie gut eine Ontologie eine Konzeptionalisierung spezifiziert, zeigt sich in ihrer Passung mit dem Sprachgebrauch der Sprechergemeinde, in deren Rahmen sie entstanden ist. Wie gut die einer Ontologie zugrundeliegende Konzeptionalisierung zum Verständnis einer Domäne dienlich ist, soll von der Bewertung einer Ontologie weitestgehend ausgeklammert werden. Ontologien spezifizieren in diesem Sinn eine gegebene Fachsprache. Konstituierende Dokumente einer Fachsprache werden in der Regel in Form von Lehrbüchern ausgewiesen. Die Angabe von intendierten Anwendungen einer Theorie besteht damit – wenn übertragen auf formale Ontologien – in der Angabe von passenden Textdokumenten. Die Rolle der paradigmatischen Anwendungen im wissenschaftlichen Verständnis, die konstitutiv für das Wesen einer Theorie sind, werden durch Dokumente mit maximalem Konsens (in der Regel Lehrbücher) spezifiziert. Einer Messung innerhalb eines Experimentes in den Größen einer Theorie entspricht die Reformulierung von Textabschnitten im Vokabular einer Ontologie *als* Ontologie.

zu 3) Mit der Bezugnahme einer Ontologie auf andere Ontologien ergibt sich in wissenschaftstheoretischer Sprache ein *Holon*. Eine Diskussion zur Bewertung von Brückenstrukturen innerhalb eines Holons findet sich in Kapitel 3.

zu 4) Das Vorhandensein einer domänenspezifischen Modellierung wirkt sich positiv auf den Erfolg von Software aus [Nugroho und Chaudron, 2009]. Da sich dieser Zusammenhang jedoch nur statistisch nachweisen läßt, kommt die Qualität von Software zur Evaluierung der zugrundeliegenden Ontologie kaum in Betracht.

Das Verständnis formaler Ontologien als Spezifikation des Sprachgebrauchs einer Sprechergemeinschaft zeichnet sich – da Sätze in Bezug zu Sätzen gestellt werden [Neurath, 1931]– als evaluierbarer Zugang zum Grounding einer Ontologie aus. Für die Spezifikation der intendierten Anwendungen einer formalen Ontologie empfehlen sich Fachtexte. Dieses linguistische Grounding der Empirie von Ontologien macht im Gegensatz zu den verbreiteten realistischen[Smith, 2004][Smith, 2004] oder psychologischen[Gruber, 1993b] Deutungen ein kulturelles Artefakt menschlicher Kommunikation zum betrachteten Gegenstandsbereich. Gegenstand sind dabei nicht die verwendeten Wörter, wie es im

Fälle von linguistischen Ontologien wie *wordnet* [Miller, 1995] der Fall ist, sondern getroffene Aussagen innerhalb eines Verwendungskontextes, beispielsweise das Reden über Wein, das Reden über Gene oder das Reden über die Produkte in eines Herstellers. Diese Aussagen über den inhaltlichen Zusammenhang zwischen Begriffen sollen durch Aussagen über die Klassen einer Ontologie modelliert werden. Diese Idee läßt sich bis in die sprachphilosophische Deutung von Logik bei Frege zurückverfolgen:

„Es ist das Psychologische von dem Logischen, das Subjective von dem Objectiven scharf zu trennen;

Nach der Bedeutung der Wörter muss im Satzzusammenhange, nicht in ihrer Vereinzelung gefragt werden;

Der Unterschied zwischen Begriff und Gegenstand ist im Auge zu behalten.“
[Frege, 1884, S. X]

Die strukturalistische Rekonstruktion dieses Ontologieverständnisses in Form eines Theorieelementes erfordert eine Übertragung von Textdokumenten in einen *non statement view*. Gegeben ein Korpus an Texten, ist dafür eine Menge von Modellen – die intendierten Anwendungen I von $T(\mathcal{O})$ – anzugeben. Dafür wird jedes Dokument des Textkorpus in den Vokabeln von \mathcal{O} rekonstruiert. Die aktuellen Modelle der so entstehenden Ontologiefragmente ergeben in ihrer Vereinigung die Menge I intendierter Modelle von \mathcal{O} . Die Kodierung von Fachtexten in Form von Axiomen eines Repräsentationsformalismus' kommt einer Bildung von Protokollsätzen nahe (siehe auch [Neurath, 1932]). Die Rekonstruktion in Vokabeln sichert den Modellen in I einen gemeinsamen Strukturtyp zu. Die Einschränkungen für Vokabeln innerhalb eines Ontologierepräsentationsformalismus' sorgen für eine Beschränkung der Rekonstruktion auf terminologische Anteile der Texte. Die Rekonstruktion von Texten als formale Ontologien setzt ein Vorverständnis der verwendeten Vokabeln voraus. Wird die Bedeutung einzelner Vokabeln hingegen erst durch die Ontologie \mathcal{O} spezifiziert, sind diese *theoriegeladen* und müssen von der weiten Betrachtung ausgeschlossen werden (siehe den folgenden Absatz zur Theoriegeladenheit).

Theoriegeladenheit

Termdefinitionen in formalen Ontologien ist formal nicht anzusehen, ob sie Nominal- oder Realdefinitionen sind. Während in Nominaldefinitionen ein neuer Name für eine Beschreibung vergeben wird, wird in Realdefinitionen ein bekannter Name durch sein Definiens formal expliziert [Stegmüller, 1989]. Soll eine formale Ontologie auf Passung zu einer empirischen Basis überprüft werden, sind per Nominaldefinition eingeführte Terme nur interpretierbar, indem auf jene Nominaldefinitionen zurückgegriffen wird. Unter der Annahme der Definition eines Begriffs läßt sich deren sprachgebrauchsgemäße Verwendung nicht evaluieren. Nominaldefinitionen können einerseits technische Artefakte in Folge von Repräsentationsvorgaben sein. So erlauben Hilfsklassen eine bequemere Formulierung komplexer Termbeschreibungen, diese werden außerhalb der Ontologie jedoch nicht verwendet. Weiterhin kann das Ontologie-Design die Existenz von Infimum- oder Supremumklassen verlangen [Ganter und Wille, 2013], die ebenfalls nicht außerhalb der Ontologie Verwendung finden. *Encoding bias* heißt das Resultat von Repräsentationsentscheidungen, welche lediglich aus technischen Gründen der Notation gemacht

werden [Gruber, 1993b, S. 3]. Zum anderen kann eine formale Ontologie das unmittelbare Medium eines wissenschaftlichen Diskurses innerhalb der eigenen Disziplin sein.

Neben Nominaldefinitionen können Ontologien weitere Artefakte ohne Bezug zu Vorkommen in Texten besitzen. Nicht nur die Ontologie selbst ist ein solches Artefakt, auch die in ihr enthaltenen Definitionstexte. Sobald Ontologien, Klassen, Rollen oder Axiome annotiert und damit zum Gegenstand erhoben werden, entstehen durch die Ontologie geschaffene, neue Entitäten ohne Urbild im Sprachgebrauch.

Mit Hilfe des strukturalistischen Konzepts partiell potentieller Modelle können F Anteile markiert und von der Formulierung einer empirischen Behauptung ausgeschlossen werden. Potentielle Modelle werden dafür durch eine Projektion auf Modelle ohne nominaldefinierten oder artifiziellen Terme beschnitten. Von den Komponenten $\langle D_1, \dots, D_i; A_1, \dots, A_j; R_1, \dots, R_k \rangle$ eines Theorieelementes zur Repräsentation einer Ontologie \mathcal{O} betrifft das: 1) Domänen aus D_1, \dots, D_i die zum Zwecke der Attribution von Klassen und Rollen künstlich eingeführt worden sowie 2) Domänen und Relationen aus D_1, \dots, D_i und R_1, \dots, R_k die durch Nominaldefinitionen eingeführt wurden. Die um theoriegeladene D_m und R_n verkürzten Strukturen $\langle D_1, \dots, D_{m-1}, D_{m+1}, \dots, D_i; A_1, \dots, A_j; R_1, \dots, R_{n-1}, R_{n+1}, \dots, R_k \rangle$ werden durch die Menge partiell potentieller Modelle M_{pp} des Theorieelementes $T(\mathcal{O})$ repräsentiert.

Die empirische Behauptung einer Ontologie

Die empirische Behauptung einer Ontologie als Spezifikation des Sprachgebrauchs einer Sprechergemeinschaft besteht in einem Passungsverhältnis zwischen einem Sprachgebrauch in einem Vokabular und dessen Axiomatisierung. Wird der Sprachgebrauch einer Sprechergemeinschaft durch eine formale Ontologie \mathcal{O} spezifiziert und wird die Ontologie \mathcal{O} samt ihres Verhältnisses zur Sprechergemeinschaft durch ein Theorieelement $T = T(\mathcal{O})$ rekonstruiert, so werden in der *non statement*-Sichtweise das durch \mathcal{O} festgelegte Vokabular – genauer dessen Signatur – durch eine Menge potentieller Modelle $M_p(T)$ rekonstruiert. Die Axiomatik von \mathcal{O} wird durch eine Menge aktueller Modelle $M(T)$ rekonstruiert. Der Sprachgebrauch der Sprechergemeinschaft, spezifiziert durch eine Menge von repräsentativen, paradigmatischen Dokumenten, wird durch eine Menge intendierter Anwendungen $I(T)$ repräsentiert. In einer ersten Näherung läßt sich die partielle Spezifikation von $I(T)$ durch $M(T)$ in der Sprache $M_p(T)$ durch Suppes'sche empirische Behauptung einer Theorie ausdrücken: [McKinsey und Suppes, 1953]

$$I(T) \subseteq M(T) \subseteq M_p(T).$$

Diese Urformel der empirischen Behauptung im *non statement view* ähnelt der Charakterisierung Guarinos, wonach eine Ontologie O in der Spezifikation ihrer Modelle $M(O)$ nach oben durch die Modelle $M(L)$ der verwendeten Sprache L und nach unten durch die intendierten Modelle $I_K(L)$ des ontologischen Commitments K in der Sprache L beschränkt ist:

$$I_K(L) \subseteq M(O) \subseteq M(L)$$

Unter Ausschluß der theoriegeladenen Anteile durch eine Restriktionsfunktion ergibt sich

als empirische Behauptung einer Theorie,

$$I(T) \subseteq \hat{r}(M(T)).$$

Unter Anhebung der Beschreibung eines Systems durch ein Modell auf die Beschreibung durch Mengen strukturgleicher Modelle ergibt sich die empirische Behauptung einer empirischen formalen Ontologie (Gleichung 2.3):

$$I(T) \in \mathbf{P}\left(\hat{r}(M(T))\right).$$

2.5 Beispiel einer strukturalistisch rekonstruierten Ontologie

Gegeben sei eine in Beschreibungslogik notierte Formale Ontologie **FAM** über biologische Familienverhältnisse (nach [Gómez-Pérez u. a., 2004]). Syntax und Semantik der verwendeten *attributive language* mit *complements* und *number restrictions* (\mathcal{ALCN}) ist definiert in Tabelle 2.2 sowie Gleichungssystem 2.5.

$$\text{Female} \sqsubseteq \top \quad (2.8)$$

$$\text{Male} \sqsubseteq \top \quad (2.9)$$

$$\text{Male} \sqcap \text{Female} \sqsubseteq \perp \quad (2.10)$$

$$\text{Person} \sqsubseteq \top \quad (2.11)$$

$$\text{hasChild} \sqsubseteq \top \times \top \quad (2.12)$$

$$\text{Woman} \equiv \text{Person} \sqcap \text{Female} \quad (2.13)$$

$$\text{Man} \equiv \text{Person} \sqcap \text{Male} \quad (2.14)$$

$$\text{Mother} \equiv \text{Woman} \sqcap \exists \text{hasChild}.\text{Person} \quad (2.15)$$

$$\text{Father} \equiv \text{Man} \sqcap \exists \text{hasChild}.\text{Person} \quad (2.16)$$

$$\text{Parent} \equiv \text{Father} \sqcup \text{Mother} \quad (2.17)$$

$$\text{Grandmother} \equiv \text{Mother} \sqcap \exists \text{hasChild}.\text{Parent} \quad (2.18)$$

$$\text{MotherWithoutDaughter} \equiv \text{Mother} \sqcap \forall \text{hasChild}.\neg \text{Woman} \quad (2.19)$$

Die strukturalistische Rekonstruktion der Ontologie **FAM** samt Anteilen des durch sie spezifizierten Sprachgebrauchs besteht in einem Theorieelement $FAM = \langle M_p, M, M_{pp}, C, L, I \rangle$.

2.5.1 Rekonstruktion potentieller Modelle von *FAM*

Die potentiellen Modelle des Theorieelementes *FAM* repräsentieren den Typ der Strukturen $\langle D_1, \dots, D_i; A_1, \dots, A_j; R_1, \dots, R_k \rangle$, in denen die Ontologie **FAM** strukturalistisch interpretiert wird. Die grundlegenden Fragen zur *Ontologie eines Theorieelementes* lauten:

1. Welche Arten von Dingen gibt es?

- a) Welche der Arten sind empirischer Natur? Mit anderen Worten: Welches sind die D_1, \dots, D_i ?
 - b) Welche der Arten sind logischer Natur? Mit anderen Worten: Welches sind die A_1, \dots, A_j ?
2. Welche Eigenschaften gibt es?
- a) Welche der Eigenschaften sind empirischer Natur? Mit anderen Worten: Welches sind die R_1, \dots, R_k ?
 - b) Welche der Eigenschaften sind logischer Natur? Eliminierbare (logische) Eigenschaften gehören aus strukturalistischer Sicht nicht zur Signatur einer Theorie, sie dienen lediglich einer bequemen Beschreibung von Modellen. Da eliminierbare Eigenschaften aus Sicht formaler Ontologien dennoch Erkenntnis (über einen Sprachgebrauch) vermitteln, sind sie im Kontext formaler Ontologien ebenfalls empirisch.

Die strukturalistische Dreiteilung von Bestandteilen eines Modells findet in Beschreibungslogischen Ontologien keine Entsprechung. In Beschreibungslogik können Klassen sowohl für eine Art von empirischem Gegenstand, eine Art von logischem Gegenstand oder für eine Eigenschaft stehen. Da eine formale Ontologie die zur Unterscheidung notwendigen Informationen in der Regel nicht beinhaltet, müssen diese gegebenenfalls der Konzeptionalisierung (beziehungsweise dem Sprachgebrauch) entnommen werden.

Rekonstruktion der empirischen Basismengen

Die Domänen D_1, \dots, D_i potentieller Modelle von *FAM* sind die Klassen von Gegenständen, über die innerhalb der Ontologie *FAM* gesprochen werden kann. Durch jede der Domänen wird eine der kategorialen Klassen von *FAM* rekonstruiert. Die für kategoriale Klassen infrage kommenden Toplevel-Klassen **Female**, **Male** und **Person** bilden zusammen oder in einer Teilmenge jedoch keine kategorialen Klassen, da zwar **Female** \sqcup **Male**, nicht jedoch **Person** \sqcup **Male** oder **Person** \sqcup **Female** abgeleitet werden kann (siehe Definition 2.14). Es stehen verschiedene Deutungen und Reaktionen dieser Beobachtung zur Entscheidung. Entweder läßt sich keine Menge der vorhandenen Klassen sinnvoll kategorial beschreiben. Dann verbleibt \top Oberbegriff. Oder im Sprachgebrauch gibt es eine Menge von kategorialen Begriffen, diese wurden in der Ontologie jedoch nicht ausgezeichnet. Im Fall der Ontologie *FAM* lassen sich zwei Mengen in Frage kommender kategorialer Begriffsmenge ausmachen: a) **Male** und **Female** sowie b) **Person**. Gegeben sei eine ABox:

Male(John), **Person**(John).

In Fall a) ist **Male** Hauptprädikator (Peter ist notwendig männlich), **Person** ist Nebenprädikator (Peter ist zufällig Person). In Fall b) ist **Person** Hauptprädikator (Peter ist notwendig Person), und **Male** Nebenprädikator (Peter ist zufällig männlich). Während sich keine der beiden Lesarten prinzipiell vor der anderen auszeichnet, deutet die Bezeichnung „Ontologie biologischer Familienverhältnisse“ eher auf ein Sprechen über Personen, als über Individuen der Klassen Männlich/Weiblich hin. Mit der Festlegung auf eine einzige

top level Klasse **Person** und deren Rekonstruktion als – abgesehen von Hilfsdomänen – einzige Domäne sind alle empirischen Gegenstände, über die gesprochen werden kann, Personen. Das ist eine zusätzliche Annahme, die sich aus der originalen Ontologie **FAM** nicht ableiten läßt.

Alle anderen in der Ontologie vorkommenden Klassen werden mit der Festlegung auf eine Domäne *Person* zu Eigenschaften von Personen. Für alle weiteren Konzeptdefinitionen, wie $\text{Man} \equiv \text{Person} \sqcap \text{Male}$, wird die Zuordnung von Haupt- und Nebenprädikator (männliche Person versus menschlicher Mann) eindeutig – Hauptprädikator aller Klassen ist **Person**, der Nebenprädikator spezifiziert das jeweilige Unterscheidungsmerkmal (z.B. männlich).

Rekonstruktion der Eigenschaften

Da mit Personen die einzige Menge empirischer Gegenstände der Familienontologie bestimmt wurde, werden alle weiteren Konzepte und Klassen in **FAM** als Eigenschaften repräsentiert. In strukturalistischer Rekonstruktion werden Eigenschaften als Relationen über den empirischen Basismengen und gegebenenfalls Hilfsbasismengen repräsentiert. Die Rolle **hasChild** in ihrer Rekonstruktion als Relation innerhalb der potentiellen Modelle $M_p(\text{FAM})$ eine Beschränkung des linken und rechten Wertebereichs von \top auf *Person*. In allen potentiellen Modellen in $M_p(\text{FAM})$ gilt:

$$\text{hasChild} \subseteq \text{Person} \times \text{Person}.$$

Die Klassen **Male** und **Female** erfahren eine Rekonstruktion in Rollen, indem sie als Elemente einer Hilfsklasse *Gender* reifiziert werden und mit einer Relation *isOfSex* Personen zugeordnet werden können:

$$\begin{aligned} \text{Sex} &= \{\text{male}, \text{female}\} \\ \text{isOfSex} &\subseteq \text{Person} \times \text{Gender} \end{aligned}$$

Auch die übrigen Klassen in **FAM** werden in reifizierter Form in einer Hilfsmenge *Attribute* zusammengefaßt und mit einer Relation *is_a* Personen zugesprochen:

$$\begin{aligned} \text{Attribute} &= \{\text{woman}, \text{man}, \text{mother}, \text{father}, \text{parent}, \text{grandmother}, \\ &\quad \text{motherWithManyChildren}, \text{MotherWithoutDoughter}\} \\ \text{is_a} &\subseteq \text{Person} \times \text{Attribute} \end{aligned}$$

2.5.2 Rekonstruktion aktueller Modelle von *FAM*

Nachdem mit den potentiellen Modellen $M_p(\text{FAM})$ die Signatur der empirischen Theorie **FAM** spezifiziert wurde, erfolgt mit den aktuellen Modellen $M(\text{FAM})$ die Rekonstruktion der durch die Ontologie **FAM** spezifizierten Verhältnisse zwischen den Vokabeln der Signatur.

x ist Modell des Theorieelementes $T(FAM) = \langle M_p, M, M_{pp}, C, L, I \rangle$ von Familienverhältnissen gdw. Mengen $Person$, $Attribute$, $hasChild$, is_a existieren mit

1. $x = \langle Person; Attribute; hasChild, is_a \rangle$ und x ist potentiellles Modell von FAM ($x \in M_p(FAM)$).
2. Für alle $p \in Person$ gilt $is_a(p, male) \vee is_a(p, female)$ (in Rekonstruktion von Formel 2.10).
3. Für alle $p \in Person$ gilt $is_a(p, woman) \leftrightarrow is_a(p, female)$ (in Rekonstruktion von Formel 2.13).
4. Für alle $p \in Person$ gilt (in Rekonstruktion von Formel 2.15)

$$\left(\bigvee_{p' \in Person} hasChild(p, p') \wedge isOfSex(p, female) \right) \leftrightarrow is_a(p, mother).$$

5. Für alle $p \in Person$ gilt (in Rekonstruktion von Formel 2.16)

$$\left(\bigvee_{p' \in Person} hasChild(p, p') \wedge isOfSex(p, male) \right) \leftrightarrow is_a(p, father).$$

6. Für alle $p \in Person$ gilt $is_a(p, parent) \leftrightarrow (is_a(p, father) \vee is_a(p, mother))$ (in Rekonstruktion von Formel 2.17).
7. Für alle $p \in Person$ gilt (in Rekonstruktion von Formel 2.19)

$$is_a(p, motherWithoutDaughter) \leftrightarrow \left(is_a(p, mother) \wedge \bigwedge_{p' \in Person} ((hasChild(p, p') \rightarrow \neg isOfSex(p', female)) \right).$$

Constraints Da die Ontologie **FAM** keine Bestandteile beinhaltet, die in Form von Constraints rekonstruiert werden müssen, ist jede Kombination von potentiellen Modellen eine erlaubte Constraint-Menge:

$$C = \mathbf{P}(M_p)$$

Links Da in der Ontologie **FAM** keine Bezüge zu anderen Ontologien hergestellt werden, besteht die Rekonstruktion in einem Theorieholon aus nur einem Theorieelement FAM (siehe Kapitel 3). Das Holon aus nur einem Theorieelement umfaßt immer alle potentiellen Modelle M_p des einzelnen Theorieelementes. Der lokale Anteil des Holons am Theorieelement besteht ebenfalls in allen potentiellen Modellen:

$$L = M_p$$

Intendierte Anwendung In der Ontologie *FAM* werden keine Bezüge zu einer Konzeptionalisierung, einem Commitment oder einem anderen Urbild angegeben, welche durch die Ontologie spezifiziert sind. In dem hier vorgeschlagenen *Sprachgebrauch* als Urbild einer Ontologie läßt sich *FAM* um intendierte Anwendungen ergänzen. Als paradigmatischer Text für den Sprachgebrauch des Redens über Familienverhältnisse soll, in Anbetracht des Beispielcharakters von *FAM*, Homers Odyssee dienen. In einer noch nicht formalen Darstellung ist die Menge der intendierten Anwendungen von *FAM* definiert als Literaturangabe:

$$I(FAM) = \{[Homer, 2002], \dots\}$$

Rezipiert in den durch $M_p(FAM)$ definierten Größen entsprechen die Propositionen in [Homer, 2002] (in Auswahl) einer intendierten Anwendung $i \in I(FAM)$:

$$\begin{aligned} Person &= \{Laertes, Antikleia, Odysseus, Ktimene, Penelope, Telemachos\} \\ hasChild &= \{(Laertes, Odysseus), (Antikleia, Odysseus), (Laertes, Ktimene), \\ &\quad (Antikleia, Ktimene), (Odysseus, Telemachos), (Penelope, Telemachos)\} \\ isOfSex &= \{(Laertes, male), (Antikleia, female), (Odysseus, male), (Ktimene, male), \\ &\quad (Penelope, female), (Telemachos, male)\} \\ is_a &= \{(Laertes, father), (Odysseus, father), (Antikleia, mother), \\ &\quad (Penelope, mother)\} \end{aligned}$$

$$i = \left\langle \begin{array}{l} Person; \\ \{male, female\}; \\ hasChild, isOfSex, is_a \end{array} \right\rangle$$

Empirische Behauptung Die empirische Behauptung von *FAM* ist nicht erfüllt, da das Modell i nicht Teil des empirischen Gehalts von *FAM* ist: $i \notin r(M(FAM))$. Da $M_p(FAM) = M_{pp}(FAM)$, gilt insbesondere

$$i \notin M(FAM).$$

Da in i ‚Penelope‘ keine Tochter hat, müßte wegen Formel 2.19 auch Formel $is_a(Penelope, motherWithoutDaughter)$ gelten. Da sich diese Aussage im Text aber nicht findet, wird sie in Modell i nicht rekonstruiert. Diese Beobachtung scheint in Hinblick auf größere Ontologien unbefriedigend. Das Problem tritt auf, sobald Klassen nicht nur mit notwendigen Bedingungen – via \sqsubseteq –, sondern auch hinreichend (via \equiv) definiert sind und die vorliegende Weltbeschreibung unvollständig ist. Unter Zuhilfenahme der *open world assumption* ist es möglich, Beschreibungslücken, die zum empirischen Falsifizieren einer terminologischen Theorie führen würden, zu schließen: Das Fehlen der Aussage $is_a(Penelope, motherWithoutDaughter)$ könnte dann nicht als $\neg is_a(Penelope, motherWithoutDaughter)$, sondern als noch unbestimmt gedeutet werden. Inwieweit die *open*

world assumption mit der Formulierung einer empirischen Behauptung einer Theorie verträglich ist, erfordert jedoch eine weiterführende, eigenständige Untersuchung. Eine andere Möglichkeit im Umgang mit vollständigen Definitionen und unvollständigen Beschreibungen bietet der Ausschluß vollständig definierter Klassen aus partiell potentiellen Modellen M_{pp} . Vollständig definierte Klassen wie **Woman** oder **MotherWithoutDaughter** stehen dann weiterhin zur Formulierung von Axiomen zur Verfügung, der definitorische Effekt auf jene Klassen selbst wird jedoch aus der empirischen Behauptung ausgeklammert.

2.6 Fazit

Der konzeptionelle Kern von formalen Ontologien gleicht in vielen Aspekten dem Standardverständnis wissenschaftlicher Theorien im Sinne von Wohlgenannt [1969, S. 197]. Beide besitzen zwar eine wohldefinierte formale Semantik, jedoch keine formal darstellbare empirische Behauptung. Die empirische Erweiterung wissenschaftlicher Theorien hin zur strukturalistischen Konzeption, läßt sich auch an formalen Ontologien vornehmen. Ein empirischer Bezug läßt sich durch drei konzeptionelle Erweiterungen an formalen Ontologien herstellen.

1. Strukturalistische Modelle besitzen gegenüber beschreibungslogischen Modellen mehrere Basismengen. Mit diesen läßt sich leichter eine Semantik von Brückengesetzen formulieren. Außerdem wird die Problematik Haupt- und Nebenprädikator gelöst. Durch die ausschließliche Verwendung von kategorialen Klassen in formalen Ontologien, lassen sich mehrere Basismengen durch eine einfache Designkonvention erzielen.
2. Strukturalistische Modelle erlauben die Angabe von intendierten Anwendungen und ermöglichen damit die Formulierung einer empirischen Behauptung. Die Angabe eines Sprachgebrauchs in Form von Textquellen ermöglicht die Angabe intendierter Anwendungen auch innerhalb rein formaler Ontologien. Wird der Sprachgebrauch als Ontologiefragment rekonstruiert, ergibt er intendierte Anwendungen in Form formaler Modelle, die die Formulierung einer empirischen Behauptung erlauben. Intendierte Anwendungen erlauben darüberhinaus einen neuen Workflow der Ontologieentwicklung. Nach der strukturalistische Idee der *lokalen Modellierung* wird jedes einzelne System durch ein Modell repräsentiert. Die Axiomatisierung einer Theorie erfolgt dann als Modellierung aller intendierten Anwendungen. Die Modellierung einer formalen Ontologie ist so als Explikation der Extension eines Sprachgebrauchs verstehbar.
3. In strukturalistischen Modellen können theoriegeladene Klassen von der empirischen Behauptung eines Theorieelementes ausgeklammert werden. Artefakte innerhalb der Notation von Theorieelementen können somit kenntlich gemacht werden. Das Ausklammern theoriegeladener Bestandteile verhindert Störungen des empirischen Gehaltes oder des Verständnisses von Theorien. Formale Ontologien lassen sich durch ein einfaches, binäres Klassen- bzw. Rollenattribut um die Auszeichnung theoriegeladener Klassen und Rollen erweitern.

3 Verknüpfung von Wissen

3.1 Einordnung und Thesen

Die Betrachtung von Wissen in Isolation (Kapitel 2) genügt, solange selbst erhobene Daten verarbeitet, oder elementare wissenschaftliche Theorien veranschaulicht werden. Praktisch relevante Szenarien lassen sich dagegen in einer Betrachtung durch lokale Theorien oder Wissensbasen nur begrenzt erfassen. Als Ursache wird zum einen die Komplexität und Vielschichtigkeit realweltlicher Systeme angeführt (Cartwright [1999] und Mitchell [2008] erlangten viel Aufmerksamkeit und Popularität mit dieser These). So kommt durch evolutionäre Prozesse Neues in die Welt, das in seinen Eigenschaften nicht auf vorherige Gesetzmäßigkeiten zurückführbar ist. Dem entgegen wird argumentiert, daß sich eine Zunahme an Spezialisierung und Differenzierung innerhalb von Wissenschaften [Neurath, 1938] und Wissensbasen [Parent und Spaccapietra, 2009] vollzieht. Im Zuge der ansteigenden Differenzierung gehen vormals ganzheitliche in komplexe Betrachtungen eines Systems über. Der multifaktoriellen Beschreibung komplexer Systeme soll im Programm der Einheit der Wissenschaft durch Aufdecken der innerliegenden intertheoretischen Brücken zu einem einheitlichen Bild von Wissenschaft verholfen werden [Neurath, 1938]. Die Unterscheidung in ein pluralistisches und ein Vereinheitlichendes Verständnis bringt je eigene Arten von Brückengesetzen mit sich und dient in deren genaueren Betrachtung als grundlegende Gliederung.

Komplexe Systeme stellen auch innerhalb der Wissensrepräsentation einen konstituierenden Gegenstandsbereich dar [Davis u. a., 1993]. Wie in der Wissenschaftstheorie lassen sich im großen Maßstab zwei grundsätzliche Reaktionen auf Komplexität ausmachen: 1) *Modularisierung*. Da als komplex bezeichnete Systeme in der Regel komplizierte Beschreibungen und Problemstellungen bedeuten, wird eine Aufteilung in möglichst unabhängige Teilaspekte angestrebt [Schwill, 2003]. Während Module jeweils eigenständige, einfache und unterschiedliche Teilaspekte abdecken, ergeben sie im Zusammenwirken eine komplexe Funktionalität. 2) *Verteilung und Vernetzung*. Wissen liegt – und das nicht erst seit der Etablierung des Internets – verteilt vor. Neu für das Problemlösen in komplexen Systemen ist die Vernetzung durch den automatisierten Zugriff auf fremde Informationsressourcen. Da die Verteilung von Wissen im Netz keiner zentralen Steuerung oder inhaltlichen Verwaltung unterliegt, ist die Struktur insbesondere des WWWs entsprechend heterogen. Werden Informationen zwischen involvierten Informationssystemen ausgetauscht, findet auch ein Wechsel der zugrundeliegenden konzeptionellen Basis statt. Es ist die Vision des Semantic Webs, den Übergang zwischen Informationssystemen auch in der heterogenen Umgebung des WWW zu ermöglichen [Berners-Lee u. a., 2001].

Auch wenn die im Rahmen des Semantic Webs entstandenen Standards und Techniken in der Regel eine definierte *formale* Semantik besitzen, ist in der Formulierung einer

empirischen Semantik – die also eine empirische Falsifikation erlaubt – bisher wenig Bestreben erkennbar. Zwar existieren eine Vielzahl von unterschiedlichen Verfahren und Maßen [Grau u. a., 2013] um die Güte von Alignment-Verfahren zu bewerten, diese beruhen jedoch im Wesentlichen auf Ähnlichkeitsmaßen [Euzenat und Shvaiko, 2013]. Einem strengen Begriff von ‚Wissen‘ wird der in Brückenstrukturen dargestellte Gehalt kaum gerecht. Der wissenschaftstheoretische Strukturalismus kann mit seinen Brückenstrukturen Vorlage für die Erklärung bestehender Semantiken und eine empirischen Semantik sein. In Bezug auf die zentralen Thesen (Seite 22) dieser Arbeit soll innerhalb dieses Kapitel folgendes gezeigt werden:

These 1'': Verknüpfungen verteilter Informationssysteme können durch das strukturalistische Brückenmodell interpretiert werden.

These 2'': Strukturalistische Brücken bieten eine ausdrucksstärkere Modellierung verteilten Wissens, als beschreibungslogische Ansätze.

These 3'': Die Theoriereduktion bietet in ihrer strukturalistischen Explikation ein Grounding für die Verknüpfung von Wissensbasen.

These 4'': Die Prämissen für die korrekte Interpretation von Ontology Alignments lassen sich formal spezifizieren.

These 5'': Die Reduktion und Theoretisierung bildet einen Rahmen zur Erklärung der Verknüpfung verschiedener Wissensbasen.

Abschnitt 3.2 verschafft einen Überblick über Brückenstrukturen im Wissenschaftstheoretischen Diskurs. Die darauf aufbauende exakte Explikation verschiedener Brücken-Typen orientiert sich im Wesentlichen an der strukturalistischen Auffassung, insbesondere am Ausbau dieses Gebietes durch C.U. Moulines [Moulines, 2006]. In Abschnitt 3.3 werden Techniken und Aufgaben der Verknüpfung von Wissen innerhalb der Wissensrepräsentation systematisiert dargestellt. Diese werden im darauffolgenden Abschnitt 3.4 strukturalistisch gedeutet. In Abschnitt 3.5 wird eine eigene strukturalistisch motivierte Semantik von Ontology Alignments vorgestellt.

3.2 Brückenstrukturen in wissenschaftlichen Theorien

“[...] das Hauptziel einer jeden Wissenschaft ist und bleibt die Verschmelzung sämtlicher in ihr groß gewordener Theorien zu einer einzigen, in welcher alle Probleme der Wissenschaft ihren eindeutigen Platz und ihre eindeutige Lösung finden.“

(Planck 1949, S. 106)

3.2.1 Globale Strukturen der Wissenschaft

Die beiden Grundanschauungen einer wissenschaftlichen Gesamtbetrachtung, Pluralismus und Einheitlichkeit (siehe [Mitchell, 2008]), stehen innerhalb der Debatte des 20. Jahrhunderts in engem Zusammenhang mit jeweils propagierten Brückenstrukturen. Während

die These von der Einheit der Wissenschaft eng mit dem Konzept der Theoriereduktion verbunden ist [Bechtel und Hamilton, 2007; Suppes, 1978], ist die pluralistische Anschauung mit einer Reduktionismuskritik und der Betonung holistischer Zusammenhänge verbunden (siehe zum Beispiel [Fodor, 1974]). Unter den vielen diskutierten Formen von Reduktion (vgl. Systematisierungen in [Suppes, 1978] und [Sarkar, 1992]) soll im Rahmen von empirischem wissenschaftlichen Wissen, die Theoriereduktion betrachtet werden. Eine Theorie T heißt *reduzierbar* auf eine Theorie T' , gdw. T aus T' ableitbar ist [Nagel, 1971]. Dagegen heißt ein System *Holismus*, gdw. eine Theorie des Gesamtsystems nicht aus Theorien über deren Subsysteme abgeleitet werden kann [Seevinck, 2004, S. 705]. Für Reduktionisten wie Neurath [1931] oder Carnap [1998] ist Reduktion ein zentrales Brückenkonzept, weil sie Theoriereduktion als identisch mit Erklärung erachten [Sarkar, 1992]. Da es sich bei der Ableitung einer Theorie nach Nagel [1971] um eine Ausprägung des Deduktiv-Nomologischen Modells (siehe [Hempel und Oppenheim, 1948]) handelt, werden Erklärung und Reduktion im Kontext von Theorien zu synonymen Begriffen. Eine Theorie vollständig zu erklären, heißt damit nach Scheibe [1997, S. 1], sie vollständig auf eine andere Theorie zu reduzieren. Ein so entstehendes „Schichtenmodell“ der Wissenschaften [Oppenheim und Putnam, 1958], macht die Physik oder Wahrnehmungspsychologie zur ultimativen Grundlage jeder Wissenschaft.

In dem Bestreben der Vereinheitlichung einer Wissenschaft, wie es von der Antike (siehe [Aristoteles, 1985]) bis in die moderne Wissenschaftstheorie zum Ziel erklärt worden ist (z.B. von Neurath 1931; Carnap 1998), liegt die Ursache des vitalen Interesses an der Theorie-Reduktion. Reduktion bildet die Brücken, mittels welcher Theorien durch andere Theorien erklärt werden und stellt damit das Gerüst einer vereinheitlichten Wissenschaft dar. Im Gegensatz zu anderen Typen von Brücken, tragen Reduktionen nicht zu einer empirischen Verstärkung der beteiligten Theorien bei, sondern dienen dem metawissenschaftlichen Ziel einer wissenschaftlichen Vereinheitlichung. Dieses sogenannte *Einheitswissenschaftliche Programm* ist erstmals von Nagel [1971] definiert worden. In einer vagen Formulierung hat dieser zum Ziel, Wissenschaften mit komplexen Entitäten, auf Wissenschaften mit einfacheren Entitäten zu reduzieren und letztlich auf (den) einen wirklichen Grundbaustein zurückzuführen. Die theoretischen Begriffe einer Wissenschaft werden damit prinzipiell entbehrlich, da sie sich vollständig durch ein Definiens ersetzen lassen. Ein so entstehendes „Schichtenmodell“ der Entitäten der Welt wird beispielsweise durch Oppenheim und Putnam [1958] vorgeschlagen. Die ultimative Grundlage jeder Wissenschaft ist dann in der Regel empirisch oder physikalisch. In Abschnitt 3.2.4 sollen die verschiedenen verwendeten Arten der Reduktion systematisiert und formalisiert werden.

Am Konzept der Theoriereduktion ist sowohl praktische, als auch konzeptionelle Kritik geübt worden (für einen Überblick siehe [Bechtel und Hamilton, 2007]). Holisten setzen der Doktrin der Vereinheitlichung durch Reduktion, eine möglichst hohe *Kohärenz* zwischen Theorien entgegen [Bartelborth, 1996]. In Verlängerung der Quine-Duhem-These läßt sich auch im Gefüge mehrerer Theorien eine Falsifikation nicht auf eine Einzeltheorie zurückführen. Stattdessen stützen sich alle involvierten Theorien gegenseitig und ergeben auch in ihrem Erklärungsanspruch ein Ganzes.

Beispiel 3.1. Soll die Dynamik geladener Teilchen in elektromagnetischen Feldern beschrieben werden, kann auf die Theorie der Partikelmechanik sowie die Theorie der

Elektrostatik zurückgegriffen werden. Jede dieser Theorien ist in sich geschlossen. Das Konzept der Ladung gehört ebenso wenig zur Theorie der Partikelmechanik, wie das Konzept der Masse zur Elektrostatik gehört bzw. dafür notwendig ist. Dennoch reichen beide Theorien für sich genommen nicht zur Beschreibung der Gesamtdynamik, sondern müssen in Verbindung gesetzt werden. Weder läßt sich die Partikelmechanik auf die Elektromechanik reduzieren, noch umgekehrt. In strukturalistischer Sprechweise sind Partikelmechanik und Elektrostatik Theorieelemente verschiedener Theorienetze. Vermittels eines *Links* bilden beide ein *Theorieholon* [Bartelborth, 1996].

3.2.2 Ein Formales Framework Intertheoretischer Relationen

Bereits das Konzept der wissenschaftlichen Theorie wird ambig verwendet. Je nach Verwendung läßt sich eine Theorie strukturalistisch als Modellmenge, als Theorieelement, als Theorienetz, als Theorieholon oder als Theorieevolution rekonstruieren. Abhängig davon ergeben sich auch beim Sprechen von Brückengesetzen verschiedene Explikationen. Die hier zusammengefaßte Darstellung verschiedener Konzepte von Brücken folgt der strukturalistischen Rekonstruktion durch Moulines [1984; 1996]. Allen Brücken-Typen ist die Darstellung als eine Relation über Modellmengen gemein. Jedes Tupel innerhalb der Brücken-Relation kann als Modell eines Brückenaxioms verstanden werden.

Definition 3.1. (Nach [Moulines und Polanski, 1996]) Seien M_p^1, \dots, M_p^n (verschiedene oder gleiche) Mengen potentieller Modelle. Dann heißt β eine *Brücke* über $\langle M_p^1, \dots, M_p^n \rangle$ gdw.

1. $n > 1$
2. $\emptyset \neq \beta$
3. $\beta \subseteq M_p^1 \times \dots \times M_p^n$

Parallel zur ambigen Verwendung des wissenschaftstheoretischen Brückenbegriffs, sind auch Brücken gemäß Def. 3.1 nur schwach bestimmt. Durch Klassifikation der involvierten Mengen potentieller Modelle, lassen sich aus dem allgemeinen Brückenbegriff alle anderen strukturalistisch beachteten Brückentypen ausdifferenzieren. Ist eine Brücke $\beta \subseteq M_p^1 \times \dots \times M_p^n$ über einem Tupel potentieller Modelle eines Theorieelementes T definiert ($M_p^1 = \dots = M_p^n = M_p(T)$), heißt die Brücke β *Constraint* (siehe Kapitel 2). Sind M_p^1, \dots, M_p^n potentielle Modelle verschiedener Theorieelemente eines Theorienetzes, so ist die Brücke β eine potentielle Spezialisierungsrelation zwischen Theorieelementen (siehe Kapitel 4). Stammen die Modellmengen zwischen denen eine Brücke hergestellt werden soll, nicht aus einem Theorieelement oder einem Theorienetz, sondern werden gänzlich verschiedene Theorien miteinander verknüpft, spricht man im Strukturalismus von *Theorie-Links*.

Definition 3.2. Sei λ eine Brücke über $\langle M_p^1, \dots, M_p^n \rangle$. λ heißt *Link* über $\langle M_p^1, \dots, M_p^n \rangle$ gdw. alle M_p^i ($1 \leq i \leq n$) paarweise verschieden sind.

Im *statement view* werden Theoriebrücken notiert, indem zusätzlichen zu den Gesetzen der involvierten Theorien T_1, \dots, T_n Brückengesetze B angegeben werden, in denen die

Größen der T_1, \dots, T_n ins Verhältnis gesetzt werden. Sollen die durch B verknüpften Theorien T_1, \dots, T_n auf ein System angewendet werden, müssen sowohl die Gesetze der T_1, \dots, T_n , als auch die in B erfüllt sein. In einer Übersetzung in den *non-statement-view* muß für eine Anwendung A und deren Modelle $m_1 \in M_p(T_1), \dots, m_n \in M_p(T_n)$ in den Konzeptionalisierung der jeweiligen T_1, \dots, T_n gelten:

1. A ist potentiell Modell der beteiligten Theorien T_1, \dots, T_n , kurz $m_1 \in M_p(T_1), \dots, m_n \in M_p(T_n)$ und
2. die Anwendung A der Theorien T_1, \dots, T_n erfüllt die Brückengesetze B , kurz $\langle m_1, \dots, m_n \rangle \in B$ (siehe Abschnitt 2.2.2).

Die Theorien T_1, \dots, T_n samt des Links B bilden ein *Theorieholon*.

An der Definition des Links können zwei wichtige Beobachtungen gemacht werden. 1) Zum einen ist ein Link λ trivial bzw. überflüssig, wenn er vollständig sind, d.h. wenn keine Kombination von potentiellen Modellen ausgeschlossen werden, d.h. wenn gilt $\lambda = M_p^1 \times \dots \times M_p^n$. Während in der Definition des Links keine speziellen Einschränkungen gelten, liegen die Spezifika einer jeden speziellen Brückenart (wie z.B. die der Reduktion) in der Art der Ausdünnung der Menge der Tupel von potentiellen Modellen durch eine Brückentypisierung. 2) Zum anderen sind die meisten anzutreffenden Links nicht unspezifisch, sondern geben ein dyadisches (zweistelliges) Verhältnis an, indem zwei voneinander unabhängige Theorien auf ihr Verhältnis untersucht werden.

Für eine formale Typisierung verschiedener dyadischer Links, gelten die folgenden Vereinbarungen (nach [Moulines, 1992]):

- $T_1 \lambda T_2$ ist die kurze Sprechweise, in der ein Link zwischen Mengen potentieller Modelle $M_p(T_1) \lambda M_p(T_2)$, als Link zwischen ihren Theorieelementen T_1 und T_2 bezeichnet wird.
- Liegen zwei Modelle x^1 und x^2 innerhalb des Links λ – kurz $\langle x^1, x^2 \rangle \in \lambda$ – kann auch die infix-Schreibweise $x^1 \lambda x^2$ verwendet werden.
- $D_1(\lambda)$ ist die linke Domäne der Relation λ , $D_2(\lambda)$ die rechte.
- Ist x ein Modell, d.h. ein Tupel aus Basismengen und Basisrelationen, so ist $\Pi_j(x)$ das j te Element des Tupels x .

Entailment Links: *Entailment links* zwischen zwei Theorien sind dadurch charakterisiert, daß sie sich allein durch die Kombinationen von Modellen definieren, ohne Aussagen über die Struktur und Eigenschaften von Modellen zu treffen. Angelehnt an den *entailment*-Begriff der Formalen Logik, wird er über ein Mengenverhältnis zwischen Modellen definiert.

Definition 3.3. (Nach [Moulines und Polanski, 1996]) λ ist ein *Entailment Link* zwischen zwei Theorien T_1 und T_2 (geschrieben $T_1 \lambda T_2$ gdw.

1. $T_1 \lambda T_2 \wedge M(T_1) \cap D_1(\lambda) \neq \emptyset \wedge M(T_2) \cap D_2(\lambda) \neq \emptyset$

$$2. \bigwedge_{\substack{x^1 \in M_p(T_1) \\ x^2 \in M_p(T_2)}} (x^1 \lambda x^2 \wedge x^2 \in M(T_2) \rightarrow x^1 \in M(T_1))$$

Gemäß (1.) muß ein Entailment Link sowohl auf der rechten, als auch der linken Seite aktuelle Modelle besitzen. Gemäß (2.) müssen aktuelle Modelle der rechten Seite des Links, mit aktuellen Modellen der linken Seite in Relation stehen.

Determining Links: *Determining Links* sind im Gegensatz zu *entailment links* über die innere Struktur ihrer Modelle definiert. In ihnen wird eine konkrete Korrespondenz zwischen den Basismengen und Relationen der verlinkten Theorien gefordert. Wegen der in *determining links* getroffenen Zuteilung werden sie auch als *concrete link*, in Absetzung zum *abstract link* für unspezifische Links bezeichnet [Balzer u. a., 1987, S. 61] .

Definition 3.4. Seien T_1 und T_2 Theorieelemente. Sei desweiteren t^{1j} die Menge der Anwendungen von Π_j auf die potentiellen Modelle von T_1 , d.h. $t^{1j} = \{\Pi_j(x) : x \in M_p(T_1)\}$. Dann heißt λ ein *Determining Link* zwischen T_1 und T_2 für t^{1j} gdw.

1. $T_1 \lambda T_2$ (λ ist ein Link)

$$2. \bigwedge_{\substack{x_1^1, x_2^1 \in M_p(T_1) \\ x^2 \in M_p(T_2) \\ t_1, t_2 \in t^{1j}}} (x_1^1 \lambda x^2 \wedge x_2^1 \lambda x^2 \wedge t_1 = \Pi_j(x_1^1) \wedge t_2 = \Pi_j(x_2^1) \rightarrow t_1 = t_2)$$

Hinter 2. steckt lediglich die Forderung, daß wenn zwei potentielle Modelle x_1^1 und x_2^1 aus T_1 auf dasselbe potentielle Modell aus T_2 abgebildet werden, die Extensionen eines Terms innerhalb beider Modelle aus T_1 gleich sein müssen. Ein Determining Link erzwingt damit eine Definition eines Links bezüglich eines Terms. Ein *determining link* ist damit rechtseindeutig – nicht bezüglich der Modelle die abgebildet werden – aber bezüglich der Extension eines Terms. Diese Extension wird durch den Link determiniert und ist modellinvariant.

Einen Überblick über eine Taxonomie von Brücken nach Moulines [1984] findet sich in Abb. 3.1.

3.2.3 Äquivalenz zwischen Theorien

Gemäß dem Standardtheorieverständnis sind zwei Theorien genau dann äquivalent, wenn sie denselben deduktiven Abschluß besitzen. Aus modelltheoretischer Sicht läßt sich einwerfen, daß es sich in Wahrheit um ein Identitätskriterium handelt. Aus empirischer Sicht ist dieses bereits durch die Forderung nach gleichen Strukturspezies, d.h. Theorie-Signaturen viel zu stark. Wie van Fraassen [1980] betont, erheben empirische Theorien lediglich einen Anspruch auf einen Zugang zu beobachtbaren Fakten in Form ‚empirischer Adäquatheit‘ (in Abgrenzung zu empirischer Wahrheit). Zwei Theorien sind damit bereits empirisch äquivalent, wenn sie in all ihren beobachtbaren Vorhersagen übereinstimmen. Empirische Äquivalenz bezieht sich daher nur auf die nicht-theoretischen Größen einer Theorie, in denen Übereinstimmung herrschen muß.

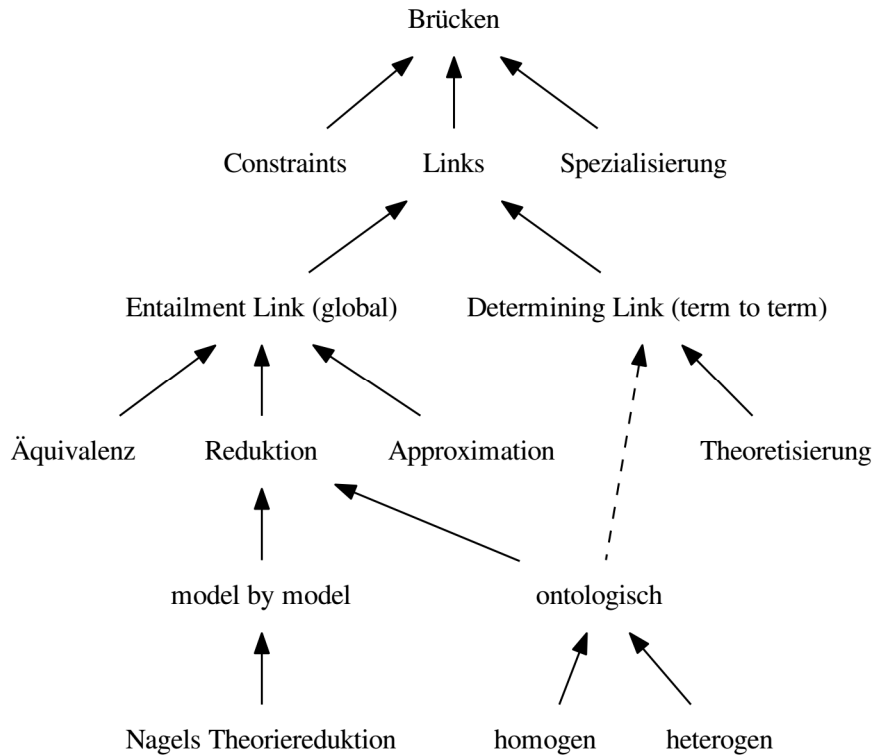


Abbildung 3.1: Reduktionstypen nach [Moulines, 1984].

Eine auf diesen Begriff aufbauende Argumentation von Fraassens wird für die weitere Betrachtung von Ontologien von Bedeutung sein: Empirische Theorien sind auf Grund der Beschränktheit des Beobachters *empirisch unterdeterminiert*. Der Unterdeterminiert wird mit Hinzufügen verschiedener Annahmen begegnet. Die daraus resultierenden Theorien sind jedoch untereinander empirisch äquivalent. Aus diesem Grund besitzen empirische Theorien stets empirisch äquivalente Theorien. Da Theorien neben der empirischen, eine pragmatische Dimension besitzen, zieht empirische Adäquatheit noch keine ebenso hohe Akzeptanz nach sich. Tatsächlich können empirisch äquivalente Theorien sogar verschiedenen Forschungsprogrammen entspringen. Eine fruchtbare, auf diesen Begriff aufbauende Definition ist die der empirischen Minimalität:

Definition 3.5. (Nach [van Fraassen, 1980, S. 68]) Eine Theorie heißt *empirisch minimal*, wenn sie empirisch nicht-äquivalent zu allen logisch stärkeren (restriktiveren) Theorien ist. Eine Theorie ist empirisch um so stärker, desto kleiner ihr empirischer Gehalt ist, mit dem sie eine gleiche Menge intendierter Anwendungen beschreibt. M.a.W. ist eine Theorie empirisch minimal gdw. sich ihre empirische Stärke nicht halten läßt, während einige ihrer Modelle (durch zusätzliche bzw. strengere Axiome) ausgeschlossen werden.

In der schwächsten Theorie T zur Anwendung auf eine Menge I intendierter Anwendungen sind alle potentiellen Modelle bereits aktual: $M(T) = M_p(T)$. Streicht man sukzessiv Modelle aus $M(T)$ derart, daß die empirische Behauptung von T wahr bleibt, gelangt man schließlich zu einer stärksten Theorie T' in der keine weiteren aktuellen Modelle mehr gestrichen werden können.

3.2.4 Reduktion und Reduktionismus

„There are arrows of scientific explanation that thread through the space of all scientific generalizations. Having discovered many of these arrows, we can now look at the pattern that has emerged, and we notice a remarkable thing: perhaps the greatest scientific discovery of all. These arrows seem to converge to a common source!“

(Weinberg [1987, S. 435])

Das einheitswissenschaftliche Forschungsprogramm – insbesondere innerhalb des Wiener Kreises – ist eng mit dem des Reduktionismus verbunden [Bechtel und Hamilton, 2007]. Danach lassen sich alle Wissenschaften mit Brückengesetzen auf eine gemeinsame Basis reduzieren. Sarkar [1992] unterscheidet drei Arten der Reduktion: (1) In der *Theorie-Reduktion* werden Theorien als Ganzes aufeinander reduziert. (2) In der *Erklärungsreduktion* (auch: epistemische Reduktion) werden hingegen Erklärungen und Beobachtungen von Phänomenen auf der Basis bzw. unter Rückführung auf möglichst elementarere Phänomene und Beobachtungen gemacht. (3) In der ontologischen (bzw. konstitutionellen) Reduktion werden Systeme höherer Levels, d.h. Systeme mit Domänen komplexer Entitäten, in Systeme niederen Levels mit Domänen atomarerer Entitäten zerlegt. Dies zieht eine Ordnung verschiedener wissenschaftlicher Domänen in verschiedene Level der Organisation nach sich, wie es von Oppenheim und Putnam [1958] postuliert wird. Diese Unterscheidungen finden sich auch innerhalb der strukturalistischen Rekonstruktion des Reduktionsbegriffs wieder.

Definition 3.6. (Nach [Moulines, 1984, S. 53], auf eine Beachtung theoretischer Größen und Constraints wird dort wie hier verzichtet.) Ein Theorieelement T heißt durch ρ *reduzierbar* auf ein Theorieelement T' gdw. es M'_r und I'_O gibt, so daß

1. $M'_r \subseteq M_p(T')$ und $M'_r \cap M(T') \neq \emptyset$,
2. $\emptyset \neq I'_O \subseteq I(T') \cap M'_r$,
3. $\rho : M'_r \mapsto M_p(T)$ wobei ρ *many-to-one* ist,
4. $\bar{\rho}(M'_r \cap M(T')) \subseteq M(T)$ und
5. $\bar{\rho}(I'_O) \subseteq I(T)$.

$\bar{\rho}$ ist definiert als Abbildung zwischen Modellmengen die durch Anwendung von ρ auf ihre Elemente entstehen: $\bar{\rho}(M) = \{\rho(x) : x \in M\}$

Vom reduzierten Theorieelement T und dem reduzierenden Theorieelement T' , ist T' dasjenige mit der umfassenderen erklärerischen Stärke. Es wird daher (lediglich) die Existenz eines Teils von T' in Form einer Teilmenge M'_r der potentiellen Modelle von T' gefordert, welcher isomorph zu $M_p(T)$ bezüglich des aktuellen-Modell-Seins von T' ist. Die Entscheidung ob Modelle des besagten Ausschnittes, in $M(T)$ zu liegen (oder nicht), wird durch die eindeutige Abbildung ρ übertragbar auf die Frage, ob das (via ρ)

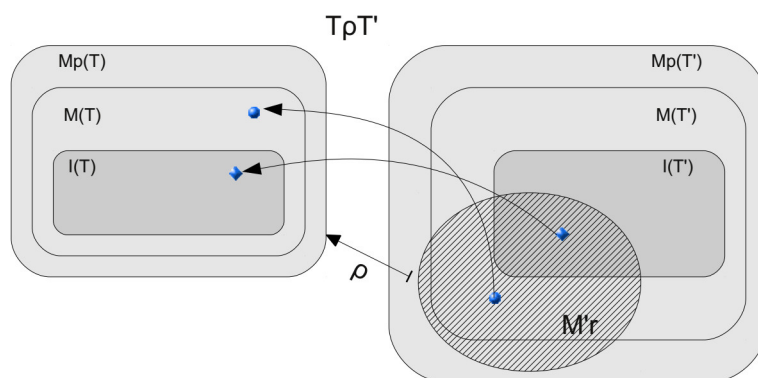


Abbildung 3.2: Reduktion einer Theorie T auf eine Theorie T' durch die Relation ρ .

zugehörige potentielle Modell aus $M_p(T)$ auch aktuelles Modell aus $M(T)$ ist. Ist man also in Besitz der reduzierenden Theorie T' und der Reduktionsrelation ρ , läßt sich die Entscheidung, aktuelles Modell von T zu sein, auch ohne T bzw. ohne $M(T)$ treffen.

Eine Gegenüberstellung der hier gegebenen Definition mit früheren strukturalistischen Definitionen gibt Niebergall [2002]. In der hier dargestellten, allgemeinen Form handelt es sich um einen *entailment link*, in dem Modelle ‚global‘ abgebildet werden. Als *model by model*-Brücke werden nur Modelle ins Verhältnis gesetzt und entgegen *determining links* nicht *term to term* abgebildet. Eine *Reduktion* wird von einem *model by model*-Link zur einer *ontologischen Reduktion*, wenn sie neben dem Erfüllen von Def. 3.6 auch eine Identität zwischen einigen der Basismengen D_i aus Modellen aus $M_p(T)$ und $M_p(T')$ erfordert. Auch wenn die Reduktion in ihrer extensionalen Explikation ein *entailment link* ist, wird die ontologische Reduktion zum *determining link* (siehe Abb. 3.1).

Definition 3.7. (Nach [Moulines, 1984]) Eine ontologische Reduktion heißt *heterogen*, wenn mindestens eine Basismenge der reduzierten Theorie derart auf eine Basismenge der reduzierenden Theorie bezogen wird, daß dadurch keine Identifikation einiger ihrer Elemente impliziert wird.

Definition 3.8. (Nach [Moulines, 1984]) Eine ontologische Reduktion ist heißt *homogen*, wenn mindestens eine Basismenge der reduzierten Theorie partiell mit einer Basismenge der zu reduzierenden Theorie identifiziert wird. Werden zwei Basismengen vollständig miteinander identifiziert, heißt die homogene ontologische Reduktion *total*, ansonsten *partiell*.

Innerhalb des reduktionistischen Programms lassen sich beide Formen der Reduktion finden, wobei am häufigsten eine Mischform anzutreffen ist (*gemischte ontologische Reduktion*).

3.2.5 Theoretisierung

Die *Theoretisierung* gehört neben der Reduktion zu den großen „paradigmatischen“ Arten intertheoretischer Bänder [Moulines und Polanski, 1996, S. 224]. Sie ist eng verwandt mit der ontologischen Reduktion mit dem Unterschied, daß durch eine Theoretisierung

nicht die *Basismengen* der rekonstruierten durch die rekonstruierenden Theorie determiniert werden, sondern deren *Relationen*. In physikalischen Theorien handelt es sich bei Relationen in der Regel um Funktionen zur Repräsentation meßbarer Eigenschaften, welche in einer Reduktion auf Größen einer anderen Theorie zurückgeführt werden. Die Theoretisierung ist damit in erster Linie ein *determining link*. Die Motivation hinter einer Theoretisierung ist, die Konzeption der meßbaren Größen einer Vorthorie T in einer Theorie T' zu formalisieren. In der theoretisierenden Theorie T' ist der Gehalt der Gesetze über den entsprechenden Größen damit nicht mehr empirisch, sondern theoretisch. In der entgegengesetzten Blickrichtung werden die (eigentlich vorher vorhandenen) nicht-theoretischen Basisrelationen der aktuellen Modelle von T , durch Relationen aus $M(T')$ determiniert [Moulines und Polanski, 1996, S. 225].

Definition 3.9. ([Balzer u. a., 1987, S. 251]) Sind T und T' Theorieelemente, wobei die potentiellen Modelle von $M_p(T)$ von T n Basisrelationen besitzen und die partiell potentiellen Modelle $M_{pp}(T')$ von T' , m Relationen besitzen.

- Dann heißt T' eine *Theoretisierung von T im schwachen Sinn* gdw. für alle $x' \in M_{pp}(T')$ gilt: Es gibt $x \in M_p(T)$, $i \leq n$ und $j \leq m$, so daß $\Pi_j(x') = \Pi_i(x)$.
- Dann heißt T' eine *Theoretisierung von T im strengen Sinn* gdw. für alle $x' \in M_{pp}(T')$ und $j \leq m$ gilt, es gibt $x \in M_p(T)$ und für alle $i \leq n$, so daß $\Pi_j(x') = \Pi_i(x)$.

Beispiele für Theoretisierungen finden sich vielfach in den Übergängen von empirischen Wissenschaften hin zur Strukturwissenschaft. So zum Beispiel in der Theoretisierung Mills empirischer Arithmetik der Kieselsteine durch Freges logisch fundierte Arithmetik [Frege, 1884] oder auch der ursprünglichen Geometrie als Landmessung durch die axiomatische, euklidische Geometrie der Gallileischen Kinematik durch die Kinematik Newtons.

Ein Charakteristikum der Theoretisierung ist, keinen Einfluß auf den *empirischen Gehalt* der verknüpften Theorien auszuüben (indem ein den einzelnen Theorien potenteres Holon konstruiert wird), sondern eine spezielle Eigenschaft des Verhältnisses zweier gegebener Theorieelemente zu bezeichnen. Die theoretisierte und theoretisierende Theorie besitzen damit ihren jeweiligen Gehalt in voller Eigenständigkeit. Der Wert der Rekonstruktion eines Theoretisierungs-Links liegt damit nicht in einer gesteigerten empirischen Aussagekraft, sondern in einem gesteigerten erklärischen Wert des Theoricholons gegenüber dessen Konstituenten – kurz, einer gesteigerten Kohärenz. Im Kohärentismus verabschiedet man sich von der Idee einer Reduktionshierarchie und mißt die Stärke einer Theorie nicht an ihrer Reduzierbarkeit auf einer bewährten Theorie, sondern an ihrem Grad der Vernetzung mit anderen Theorien.

3.3 Formalismen verteilten terminologischen Wissens in der Wissensrepräsentation

Innerhalb des Semantic Webs sind für verschiedene Einsatzgebiete eine Vielzahl verschiedener Ontologien entwickelt worden. Neben verschiedenen Ontologien für verschiedene

Anwendungen, sind darunter auch verschiedene Ontologien in mit sich überschneidenden Anwendungsbereichen. Neben diesen Fällen unabhängiger überlappenden Ontologienanwendungen bestehen zum Zweck der Entwicklungsökonomie und Interoperabilität auch gezielte Abhängigkeiten zwischen Ontologien. Dabei werden allgemeine Bereiche von Ontologien ausgelagert und lediglich der spezifische Teil einer Konzeptualisierung formalisiert. Als Systematik einer Aufteilung von Konzeptualisierung in verschiedene Ontologien hat sich eine Unterscheidung entlang des Grades an Allgemeinheit etabliert [Perez und Benjamins, 1999, S. 1-3f].

Knowledge representation ontologies dienen der Modellierung (*knowledge model*) der Primitive zur formalen Darstellung von Wissen in Wissensrepräsentationssystemen. Ein in Frame-basierten Systemen zumeist angetroffener Vertreter ist die Frame-Ontology (siehe [Farquhar u. a., 1997]). *Top-level ontologies* dienen zur Modellierung von grundlegenden Vokabeln wie Ding, Ereignis, Zeit, Raum, Kausalität, Verhalten. Dabei werden die Grundkategorien des Verstehens unabhängig von ihrem Einsatzgebiet eingeführt (siehe zum Beispiel *Basic Formal Ontology, BFO* [Arp und Smith, 2008]). *Domänen-Ontologien* stellen das universelle und wiederverwendbare Vokabular einer bestimmten Anwendungsdomäne wie z.B. der Mathematik oder Physik zur Verfügung. *Linguistische Ontologien* modellieren das Vokabular bestimmter oder beliebiger natürlicher Sprachen (siehe WordNet [Miller, 1995]). *Application Ontologies* beschreiben das notwendige Vokabular um eine konkrete Problemlösung innerhalb einer Domäne mit Anwendung einer Ontologie zu beschreiben.

Neben der Unterteilung von umfassenden Konzeptualisierungen in Ontologien verschiedener Urheber, werden auch große Ontologien modular in Teilontologien aufgeteilt. So ist *Cyg* [Lenat, 1995; Siegel u. a., 2004] mit seinen 3000 Termen und über einer Millionen Axiomen und dem Anspruch, alle Bereiche des Alltagswissens terminologisch abzubilden, in mehrere *Mikro-Theorien* aufgeteilt. Die größte freie Top-Level-Ontology, *Standard-Upper Ontology (SUO)* [Niles und Pease, 2001], erstreckt sich über 11 Sub-Ontologien. Neben einer größeren Übersichtlichkeit und besseren Wartbarkeit ergibt sich bereits in dieser Variante der Vorteil eines geringeren ontologischen Commitments bei Beschränkung auf eine Sup-Ontologie. Agenten benötigen so nur noch ein *commitment* zu den benötigten Sub-Ontologien.

Die Vielzahl an möglichen Aspekten der Verknüpfung terminologischen Wissens läßt sich in zwei Kategorien unterscheiden. Die *Sprachmittel* umfassen die formalen Techniken zur Auszeichnung von Bezügen zwischen formalen Ontologien. Die *Funktionalität* umfaßt das intendierte, logische Verhältnis das zwischen formalen Ontologien hergestellt werden soll. Eine komplexe Anwendung zur Verknüpfung von Informationssystemen in der verschiedene sprachliche und funktionale Verknüpfungen zusammenfließen, ist das Ontology Alignment. Im folgenden werden Syntax, Semantik und Ideomatik der wichtigsten Formalismen, Funktionen sowie von Ontology Alignments systematisch vorgestellt.

3.3.1 Sprachmittel zur Verknüpfung formaler Ontologien

Die in der Wissensrepräsentation eingesetzten Formalismen zur Verknüpfung terminologischen Wissens sollen im weiteren Verlauf in drei Typen unterschieden werden: 1) Namensräume, 2) Ontology-Imports und 3) Formalismen des Ontology-Alignments.

Import von Wissensbasen

Die *Inklusion* von Ontologien in Wissensbasen ist die weitest genutzte Form der Verknüpfung [Gómez-Pérez u. a., 2004, S. 78] und wird von den verbreiteten Wissensrepräsentationsformalismen unterstützt (wie z.B. OWL [Patel-Schneider u. a., 2004], Ontolingua [Chaudhri u. a., 1998] oder LOOM [MacGregor, 1991b]). Das Importieren von anderen Ontologien ist beschreibbar als Mengeninklusion der entsprechenden Axiome:

„If a[n] ontology B *includes* ontology A, then ontology B is the union of the definitions in A with those specific to B.“ [Gruber und Olsen, 1994].

Gemeinsame Namen und Namensräume

Namen sind vereinbarte sprachliche Ausdrücke die als Zugriffsindex für einen Gegenstand dienen [Poirce, 1931–1958, 2.329]. Aus dem konventionellen Charakter von Namen erwachsen zwei prinzipielle Probleme: Zum einen, wie sicherzustellen ist, daß verschiedene Verwendungen desselben Namens tatsächlich denselben Gegenstand referieren, zum anderen, daß ein Gegenstand in verschiedenen Beschreibungen mit demselben Namen bezeichnet werden sollte. Namen können innerhalb der Wissensrepräsentation sowohl Individuen als auch Begriffe, Relationen, Ontologien bezeichnen.

Im Umfeld des WWW traten Probleme auf, als mit Namen (Referenzen) auch solche Gegenstände beschrieben werden sollten, die sich außerhalb des WWW befinden. Für Verweise auf Objekte innerhalb des WWWs durch eine *Kennzeichnung* (URL-Adresse) ist die Referenz eindeutig definiert [Berners-Lee, 1989]. Insbesondere für Objekte außerhalb des WWW ist keine eindeutige Kennzeichnung mehr angebbbar, so daß diese über Namen, *unified resource identifiers (URI)*, referenziert werden [Berners-Lee, 1996]. Halpin [2009, S. 27] verbildlicht die Problematik mit: „a web-browser cannot simply access a real object like the Eifel Tower via HTTP!“ und sieht im Übergang vom *retrieval*-Konzept der *unified resource locator* (URL), hin zur Referenz im *unified resource identifier* (URI) die Evolution vom Web zum Semantic Web. Von den beiden prinzipiellen Problemen mit Namen – nämlich das verschiedener Gegenstände mit demselben Namen sowie das, verschiedener Namen für denselben Gegenstand –, soll durch das Konzept der *Namespaces* wenigstens ersteres abgeschwächt werden. Die gemeinsame Verwendung eines Namens darf (innerhalb eines Namensraumes) die Einigung auf eine Referenz vermuten lassen. Die Einigung auf die Referenz von Namen wird durch die Identifikation von Ressourcen [Gómez-Pérez u. a., 2004, S. 56] erreicht. Der Name wird in zwei syntaktische Bestandteile unterschieden: Einen *Namensraum* und einen *Namen* im eigentlichen Sinne. Namensräume werden – angelehnt an die weltweit eineindeutige Vergabe von Internet-Domännennamen – an einen Urheber geknüpft. Mit der Verwendung eines (fremden) Namensraums erfolgt ein Commitment an die Namenskonventionen des Namensrauminhabers. Tatsächlich ist damit noch nicht sichergestellt, daß alle Verwendungen eines Namen in einem Namensraums die jeweils selbe Referenz besitzen, wohl aber, daß die Verwendung gleicher Namen wenigstens nicht zufällig erfolgt. Das globale Problem der eindeutigen Referenz eines Namens wird so wenigstens – lokal – innerhalb eines Namensraumes abgeschwächt.

3.3.2 Funktionen der Verknüpfung formaler Ontologien

Die beiden wesentlichen Funktionen der Verknüpfung von Wissensbasen sind das *ontology partitioning* (Modularisierung) und *selective use and reuse* (Vernetzung) [d'Aquin u. a., 2009]. Gruber und Olsen [1994] geben am Beispiel der *ontology for engineering math* (*EngMath*) drei Funktionen der Verknüpfung an: Erweiterung, Spezialisierung und Verwendung. Eine ähnliche Unterscheidung in *extend*, *specialize* und *view of* geben Borst u. a. [1995] in der modular aufgebauten Ontologie *PhysSys* zur Modellierung, Simulation und zum Design physikalischer Systeme.

Erweiterung einer Ontologie: Beim Erweitern einer Ontologie werden einem bestehenden Grundvokabular weitere Terme hinzugefügt, wobei in der erweiterten Ontologie keine bestehenden Terme verändert werden [Gruber, 1993a]. Die Axiome zur Einführung neuer Namen müssen dazu nicht-kreativ sein, sie dürften demnach keinen direkten oder indirekten Einfluß auf die Semantik bestehender Terme nehmen. Kein Satz S über einer Sprache L , der sich vorher nicht bereits aus einer Theorie folgern ließ, darf sich unter Hinzunahme einer (nicht-kreativen) Definition aus der Theorie folgern lassen. Erweiterungen einer Ontologie bestehen damit aus Definitionen im engeren Sinne [Frege, 1971]. Die nicht-Kreativität läßt sich durch ausschließliche Verwendung von Termeinführungen zur Erweiterung einer Ontologie sicherstellen. Der typischer Weise verwendete Formalismus zur Erweiterung einer Ontologie ist der Import der erweiterten durch die erweiternde Ontologie, wobei die erweiternde Ontologie nur aus Termeinführungen besteht. Die Erweiterung einer Ontologie $\mathcal{O} = \langle N_C, N_R, N_I, AL_C, AL_R, I, R, A \rangle$ zu $\mathcal{O}' = \langle N'_C, N'_R, N'_I, AL_{C'}, AL_{R'}, I', R, A \rangle$ besteht in zusätzlichen Klassen $N'_C \supseteq N_C$ und zusätzlichen Rollen $N'_R \supseteq N_R$ die in zusätzlichen Termeinführungen $I' \supseteq I$ eingeführt werden sowie zusätzlichen Individuennamen $N'_I \supseteq N_I$. Mit dem erweiterten Vokabular N_C, N_R erweitert sich auch die Termsprache über komplexen Termen $AL_{C'}, AL_{R'}$. Durch den Import als formales Verknüpfungsmittel wird das Idiom aus Import samt zusätzlichen Termeinführungen nicht gekennzeichnet oder abgesichert.

Da sich kategoriale Begriffe (siehe Def. 2.14) gegenseitig ausschließen (*disjointness*), würde die Erweiterung um einen kategorialen Begriff, eine Bedeutungsverschiebung der bestehenden kategorialen Begriffe nachsichziehen. Da sich ferner ein gegenseitiges Ausschließen nicht durch eine Termeinführung formulieren läßt, bleiben die kategorialen Begriffe einer Ontologie von Erweiterungen unbeeinflußt.

Spezialisierung einer Ontologie: Bei der Spezialisierung einer Ontologie werden die bestehenden Klassen und Rollen einer Basisontologie monoton spezialisiert [Gruber, 1993a, S. 3]. Es werden im Gegensatz zur *Erweiterung* keine neuen atomaren Terme eingeführt, sondern bestehende Spezifikationen von (atomaren) Termen verschärft. Im Gegensatz zu Erweiterungen sind Spezialisierungen kreativ, es können also in der unveränderten Signatur einer Erweiterung neue Ableitungen gewonnen werden. Alle bisherigen Ableitungen gehen in Spezialisierungen nicht verloren, da keine Axiome entfernt werden können (Monotonie). In der Beschreibungslogik werden Spezialisierungen durch allgemeine Axiome (*general concept inclusions*, *GCI*s) erlaubt. Der typischer Weise verwendete Formalismus zur Erweiterung einer Ontologie ist der Import der erweiterten

durch die erweiternde Ontologie, wobei die erweiternde Ontologie nur aus Restriktionen besteht. Die Spezialisierung einer Ontologie $\mathcal{O} = \langle N_C, N_R, N_I, AL_C, AL_R, I, R, A \rangle$ zu $\mathcal{O}' = \langle N_C, N_R, N_I, AL_C, AL_R, I, R', A \rangle$ umfaßt lediglich zusätzliche Restriktionen $R' \supseteq R$. Das Idiom aus Import samt zusätzlichen Restriktionen ist nicht gekennzeichnet oder abgesichert gegenüber der Erweiterung einer Ontologie.

Verwendung einer Ontologie: Wird in einer Ontologie \mathcal{O}' zur Definition von Termen auf Terme einer anderen Ontologie \mathcal{O} zurückgegriffen, ohne daß deren Terme auch Teil der verwendenden Ontologie werden, besteht zwischen den entsprechenden Ontologien lediglich eine lose Kopplung. Beide beteiligten Ontologien sind auch unabhängig voneinander anwendbar, jedoch besteht zwischen beiden ein kohärenter Zusammenhang. Ein Beispiel dafür ist in *EngMath* die Definition der Einheit *Ampere* Instanz einer *Meßgröße* einer Upper-Ontologie (aus Borst u. a. [1995]). Eine semantische Kopplung zwischen verwendender (\mathcal{O}') und verwendeter Ontologie \mathcal{O} entsteht nur, wenn zum Zeitpunkt der Anwendung der verwendenden Ontologie \mathcal{O}' die verwendete Ontologie \mathcal{O} hinzugezogen wird. Das Idiom der Verwendung einer Ontologie umfaßt einen *name space* aus Namen N_C'', N_R'', N_I'' , einer *name space* verwendenden Ontologie $\mathcal{O}' = \langle N_C', N_R', N_I', AL_C', AL_R', I', R', A' \rangle$ sowie einer Terme des *name spaces* definierenden Ontologie $\mathcal{O} = \langle N_C, N_R, N_I, AL_C, AL_R, I, R, A \rangle$. Wobei gilt: $N_C'' = N_C \cap N_C'$, $N_R'' = N_R \cap N_R'$ sowie $N_I'' = N_I \cap N_I'$.

3.3.3 Ontology Alignments

Die Vision des Semantischen Webs besteht in einer über die bloße Vernetzung von Webseiten hinausgehende Vernetzung von Informationssystemen [Berners-Lee u. a., 2001]. Neben dem reinen Abruf von angebotenen Ressourcen, bedeutet das eine automatisierbare und transparente Beantwortung von Anfragen zwischen unabhängigen Informationssystemen. Zwar besteht mit der Verwendung formaler Ontologien und einheitlicher Formate wie XML und OWL bereits eine Interoperabilität der jeweils verwendeten Schemata, der Austausch von Information durch die korrekte Beantwortung von versprochenen Anfragen ist damit jedoch noch nicht gewährleistet [Euzenat und Shvaiko, 2007, S. 1]. *Ontology Alignments* sind Konzepte, zur Spezifikation der Verhältnisse zwischen den Elementen zweier Ontologien [Bruijn u. a., 2004]. Unter Bezug auf *Ontology Alignments* können Anfragen (und Antworten) in das Vokabular einer entfernten Wissensbasis übersetzt werden und damit entfernte Wissensquellen erschlossen werden (beispielsweise zwischen WordNet und Wikipedia [Ponzetto und Navigli, 2009]). *Ontology Alignments* weisen eine große Verbreitung auf. Die *OBO-foundry* als einer der größten Zusammenschlüsse biomedizinischer Ontologien wird von über 50 Alignments zusammengehalten [Smith u. a., 2007].

Für die Evaluation von *ontology alignments* existieren zwar eine Vielzahl von unterschiedlichen Verfahren und Maßen [Grau u. a., 2013], jedoch wird durch diese in der Regel die Güte von Verfahren zur Erzeugung von *alignments* bewertet, nicht das *ontology alignment* selbst. Diese Verfahren des *ontology matchings* beruhen zumeist nicht auf einer Semantik von *Ontology Alignments*, sondern bedienen sich Ähnlichkeitsmaßen über Eigenschaften der involvierten Ontologien [Euzenat und Shvaiko, 2013]. Mit verschiede-

denen Ansätzen zur Formulierung einer formalen Semantik von Ontology Alignments läßt sich dagegen die Korrektheit eines Informationsaustauschs bezüglich eines Ontology Alignments überprüfen [Zimmermann und Euzenat, 2006].

Beispiel

Von zwei Anbietern von Reisen betreibe der eine ein Informationssystem fokussiert auf Ferien- bzw. Erholungsreisen, der andere ein Informationssystem mit Fokus auf internationalen Abenteuerreisen. Beide sind teilweise an gleichen Aspekten von Reisen – wie beispielsweise der Reisedauer, den Kosten und Reisezielen – teilweise an verschiedenen Details interessiert. Während für Ferienreisen Informationen wie Unterkunftsausstattung, Verpflegungsoptionen und die Verfügbarkeit eines Swimmingpools von Interesse sind, sind es für Abenteuerreisen Impfinformationen, Schwierigkeitsgrad oder Ausrüstungsbedarf. Mit den jeweiligen Eigenschaften von Reiseangeboten basieren die Informationssysteme beider Anbieter auf verschiedenen, eigenen Reiseontologien. Möchten beide Anbieter zusammenarbeiten, indem die Angebote des einen Anbieters auch für Interessenten des anderen Anbieters buchbar sind, müssen die Gegenstände beider Ontologien O und O' ins Verhältnis gesetzt werden. Einige Facetten mögen einander direkt entsprechen – wie *journey* und *holiday*, andere wie *hotel* und *accomodation* stehen in Subsumtions- oder anderen, komplexeren, Verhältnissen. Die Spezifikation der Entsprechungen zwischen beiden Ontologien – das Ontology Alignment – ist die Menge von Korrespondenzen zwischen den Entitäten beider Ontologien. Eine einzelne Korrespondenz beinhaltet je eine Entität aus den Ontologien O und O' , so z.B. ein (komplexes) Konzept *journey* \sqcap *hill-climbing* aus O und dem elementaren Konzept *holiday* aus O' . Die erlaubte Komplexität von matchbaren Entitäten der beteiligten Ontologien $\mathcal{O} = \langle N_C, N_R, N_I, AL_C, AL_R, I, R, A \rangle$ und $\mathcal{O}' = \langle N'_C, N'_R, N'_I, AL'_C, AL'_R, I', R', A' \rangle$ wird durch deren Termformalismen über deren atomaren Namen $\langle N_C, N_R, N_I, AL_C, AL_R \rangle$ und $\langle N'_C, N'_R, N'_I, AL'_C, AL'_R \rangle$ bestimmt.

$$\begin{aligned} \text{journey} &\equiv \text{holiday} \\ \text{price} &\equiv \text{costs} \\ \text{journey} \sqcap \text{hill-climbing} &\sqsubseteq \text{holiday} \sqcap \exists \text{located-in.mountain} \end{aligned}$$

Mit Hilfe eines Alignments läßt sich auf den Datenbestand des Informationssystems zu Abenteuerreisen im Vokabular von Ferien- und Erholungsreisen zugreifen und umgekehrt.

Überblick bestehender Ansätze

Ausgehend von verschiedenen angrenzenden Disziplinen wie Datenbankmanagement, Wissensrepräsentation, Softwareentwicklung oder der Semantic-Web-Entwicklung gibt es eine Vielzahl von (Teil-) Lösungen für Alignment-bezogene Probleme. So gibt es für das Auffinden von Korrespondenzen (Ontology Matching) Ansätze auf der Grundlage von Wortähnlichkeiten der Konzeptnamen – wie in QOM [Ehrig und Staab, 2004] –, auf Grundlage der inneren Struktur der Ontologien – wie in PROMPT [Noy und Musen, 2000] –, auf Grundlage gemeinsamer Instanzen, auf Grundlage externer Referenzen wie

Upper-Ontologies, Fachdokumente – wie in FCA-Merge [Stumme und Maedche, 2001], auf Grundlage von Experteninteraktion, oder in der Kombination all jener Techniken [Ehrig und Sure, 2004] (für eine Übersicht über Matchingverfahren und deren Relevanz siehe [Kalfoglou und Schorlemmer, 2005]). Gleichzeitig kommen innerhalb der Verfahren ganz unterschiedliche Techniken wie Data-Mining, Formale Begriffsanalyse, Linguistische Verfahren oder automatische Theorembeweiser zum Einsatz. Neben konkreten Techniken bestehen bereits Ansätze zu einer formalen und technikunabhängigen Beschreibung: So zum Beispiel aufbauend auf der Übertragung von Modell-Schemata wie sie in relationalen Datenbanken verwendet werden, als Anpassung von OOP-Schnittstellen oder XML-DTDs (siehe [Bernstein u. a., 2000]), als Integration von Daten verschiedener „Daten-Schemata“ (siehe [Lenzerini, 2002]), als Morphismus zwischen den Ontologie-Signaturen samt einer pragmatischen Klassifikation verschiedener Verfahren (siehe [Kalfoglou und Schorlemmer, 2005]), oder als einer Systematisierung von Maßen zur Evaluation von Matchings (siehe [Ehrig und Staab, 2004]).

Im Mittelpunkt dieses Kapitels stehen formale Semantiken für bereits gegebene Alignments. Für deren Interpretation gibt es bereits verschiedene Ansätze: Basierend auf dem BDI-Modell wird eine Semantik auf Basis von interagierenden autonomen Agenten gegeben und im System LORA implementiert [Wooldridge, 2000, S. 47ff]. Aufbauend auf einer modallogischen Deutung von wird mit \mathcal{E} -connections [Kutz u. a., 2004] und fibered logics [Gabbay, 1996] eine Semantik für Alignments definiert. Eine Gegenüberstellung von Prädikatenlogischen und epistemischen Semantiken geben Calvanese u. a. [2004]. Eine Semantik auf Grundlage von Morphismen der Kategorientheorie geben Zimmermann u. a. [2006]. In *Annotierten Logiken* werden Beschränkungen definiert, welche die Verhältnisse von Wahrheitswerten in verschiedenen Informationssystemen beschreiben. [Subrahmanian, 1994]. In einigen Ansätzen, wie zum Beispiel innerhalb des *Ontology Integration System* (OIS) werden Alignments und involvierte Ontologien syntaktisch vereinigt [Calvanese u. a., 2002]. Eine Klasse von Semantiken basiert auf einer Erweiterung der prädikatenlogischen Semantik auf verteilte Theorien [Zimmermann und Euzenat, 2006]. Aufgrund des prädikatenlogischen Kerns von Beschreibungslogiken lassen sich Semantiken dieser Klasse leicht auf die Beschreibungslogik mit verteilten Theorien übertragen [Borgida und Serafini, 2003]. Auf Grund ihrer Nähe zur gemeinen beschreibungslogischen Semantik zum modelltheoretischen Verständnis des Strukturalismus soll die Klasse der auf verteilter Prädikatenlogik basierenden Semantiken im Fokus dieses Kapitels stehen.

Formale Syntax von *Ontology Alignments*

Ausgangspunkt der folgenden Betrachtungen sind Alignments zwischen formalen Ontologien. Ontologien sollen hier in einem beschreibungslogischen Formalismus samt dessen modelltheoretischer Semantik verstanden werden.

Definition 3.10. Ein *Ontologieelement* ist entweder ein atomarer Term einer Ontologie (ein Klassenname, ein Rollenname oder Individuenname) oder ein komplexer Term, zusammengesetzt aus anderen Ontologieelementen und Konstruktoren des Ontologieformalismus’.

In einem Alignment werden Ontologieelemente zweier Ontologien durch inter-terminolo-

gische Axiome in Beziehung gesetzt. Die Syntax dieser Axiome ist durch die Alignment-Sprache definiert. Eine übliche Definition der Syntax geben Zimmermann und Euzenat [2006]:

Definition 3.11. Eine Ontologieelementrelation R ist ein Symbol für eine binäre Relation \tilde{R} über den Ontologieelementen zweier Ontologien. Eine *ontology alignment*-Sprache ist definiert durch eine Menge \mathfrak{R} möglicher Ontologieelementrelationen R .

Typische Elemente der Menge \mathfrak{R} zur Konstruktion von intra-terminologischen Axiomen sind \sqsubseteq , \sqsupseteq , \equiv oder \perp . Eine einzelne Angabe eines Verhältnisses zwischen zwei Ontologieelementen heißt Korrespondenz, ein *alignment* ist eine endliche Menge von Korrespondenzen zwischen zwei Ontologien.

Definition 3.12. Eine *Korrespondenz* ist ein Tripel $e_1 R e_2$ wobei e_1 und e_2 Ontologieelemente der durch das Alignment verknüpften Ontologien sind. R ist eine Ontologieelementrelation, die zwischen e_1 und e_2 zu gelten angenommen wird.

Korrespondenzen können, wie in den folgenden Beispielen sichtbar wird, verschieden dargestellt werden:

$$\text{journey} \equiv \text{holiday}$$

stellt eine als beschreibungslogische Äquivalenz zweier Klassen notierte Korrespondenz dar. In, OWL-Notation,

```
<owl:Class rdf:about="#Journey">
  <equivalentClass rdf:resource="#Holiday"/>
</owl:Class>.
```

Einige Formalismen erlauben zudem die Angabe eines Konfidenzintervalls [Bouquet u. a., 2005].

$$\text{journey} \equiv_{0.85} \text{holiday}$$

stellt die obige Subsumtionsbeziehung zu 85% sicher dar.

Alignment-Axiome sind somit Angaben von Korrespondenzen zwischen Ontologieelementen zweier Ontologien. Zusammen bilden diese ein *Ontology Alignment*:

Definition 3.13. Ein *Ontology Alignment* zwischen zwei Ontologien O_1 und O_2 ist eine Menge von Korrespondenzen mit Ontologieelementen aus O_1 und O_2 .

Lokale Semantik von Einzelontologien in Alignments

Unter der Bezeichnung *lokale Semantik* eines *Ontology Alignments* soll zunächst die Semantik der beteiligten Einzelontologien beschrieben werden. Bereits hier zeigt sich eine Unterscheidung zur typischen Interpretation beschreibungslogischer Theorien. Eine Interpretation einer beschreibungslogischen Theorie umfaßt eine Domäne und eine Interpretationsfunktion, welche (einfache und komplexe) Ontologieelemente in dieser Domäne (bzw. Rollen auf die Kreuzmenge der Domäne bzw. Individuen auf ein Element

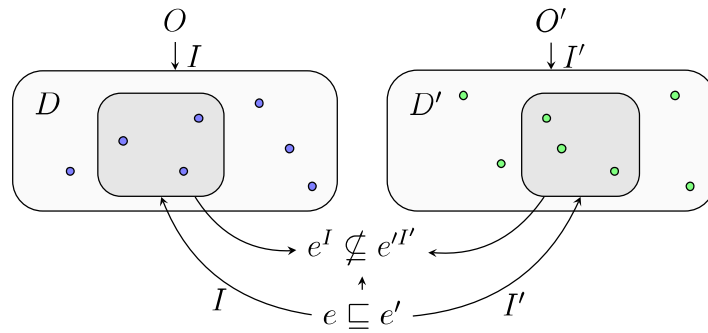


Abbildung 3.3: Naive extensionale Interpretation einer Korrespondenz.

der Domäne) abbildet (siehe dazu [Baader u. a., 2003]). Formal wird an die Domäne einer Interpretation keine Forderungen gestellt, außer nicht leer zu sein und den Wertebereich der Interpretationsfunktion zu umfassen. Die verschiedenen Domänen aller Interpretationen werden daher verschiedenster metaphysischer Art sein – beispielsweise physikalische Gegenstände, Terme, abstrakte Gegenstände, Namen oder Ideen. Die wesentliche Schwierigkeit in der Definition einer Semantik von Alignments besteht in den im Allgemeinen unterschiedlichen beteiligten Ontologien. Eine naive Semantik eines Alignments über Mengenverhältnisse der Extensionen von Ontologielelementen – über die sie innerhalb einer Ontologie definiert ist – ist damit zunächst nicht möglich. Für zwei Ontologien O und O' mit je einer Interpretation I und I' und eine Korrespondenz $e \equiv e'$ zwischen zwei Ontologielelementen e aus O und e' aus O' kann also ein Zusammenhang der Form

$$e^I = e'^{I'}, \text{ wobei } e^I \text{ die Extension von } e \text{ in der Interpretation } I \text{ ist,} \quad (3.1)$$

nicht hergestellt werden. e^I und $e'^{I'}$ besitzen, so lange zwischen den Domänen beider Interpretationen kein Zusammenhang besteht, im Allgemeinen keine gemeinsamen Elemente (siehe Abbildung 3.3.3).

Ausgehend von [Ghidini und Scafini, 1998] hat sich in den meisten Beiträgen zur modelltheoretischen Interpretation von Alignments ein spezielles Verständnis für die lokale Semantik von Ontologien durchgesetzt (z.B. [Zimmermann und Euzenat, 2006; Euzenat und Shvaiko, 2007; Bao u. a., 2006]): Die Semantik einer Ontologie O wird durch die Interpretation von Ontologielelementen und darüber definierten Axiomen definiert. Für eine Ontologie gibt es genau eine Domäne D - die Realität. Jede Interpretation beruht auf dieser einen Domäne D . Eine Interpretation *erfüllt* eine Ontologie O , wenn sie jedes Axiom in O erfüllt. Erfüllende Interpretationen heißen *Modell* der Ontologie.

Simple Distributed Semantics

Die einfachste Möglichkeit zur Reaktion auf das Problem der im allgemeinen disjunkten Domänen ist die Annahme, die Domänen der beteiligten Ontologien seien gleich oder überdeckten sich wenigstens innerhalb der Bereiche von Interesse. Diese nicht-logische Annahme kann beispielsweise für Datenbanken oder Kataloge sinnvoll gemacht werden. In diesem Fall kann eine Semantik in der Formel 3.1 angedachten Form tatsächlich definiert

werden (siehe [Zimmermann und Euzenat, 2006]):

Definition 3.14. Seien O und O' Ontologien und $c = e R e'$ eine Korrespondenz zwischen O und O' . c heißt *erfüllt* durch die Modelle m und m' von O und O' gdw. $m(e) \tilde{R} m'(e')$. Die abkürzende Schreibweise ist $m_1, m_2 \models c$.

Ein Alignment wird genau dann durch zwei Modelle erfüllt, wenn diese jede Korrespondenz einzeln erfüllen:

Definition 3.15. Für zwei Ontologien O, O' heißt ein Paar $A = (m, m')$ von lokalen Modellen von O und O' *Modell eines Alignments* zwischen O, O' gdw. für alle $c \in A$: $m, m' \models c$. Dies wird geschrieben als $m, m' \models A$. [Zimmermann und Euzenat, 2006]

Contextualized Distributed Semantics

In Fällen heterogener Domänen, in denen die Annahme der simple distributed semantic nicht gemacht werden kann, muß in einer Alignment-Interpretation der Zusammenhang (das heißt die Identität) zwischen den einzelnen Individuen explizit ausgezeichnet werden. Hier sind zwei formale Wege anzutreffen: Zum einen die *integrated distributed semantic* in der eine gemeinsame globale Domäne U samt einer Abbildung aller lokalen Domänen nach U angegeben werden (siehe [Zimmermann und Euzenat, 2006]). Die extensionale Semantik eines Alignments in Form von Gleichung (3.1) findet in Projektion auf eine beiden Ontologien gemeinsame Domäne U statt. Die andere Methode der *contextualized distributed semantics* besteht in der zusätzlichen Angabe einer Relation r für je zwei Ontologien, durch die Elemente der einen Domäne, Elementen der anderen Domäne zugeordnet werden [Zimmermann und Euzenat, 2006].

Während Interpretationen von Alignments in der simple distributed semantic lediglich aus einem Paar von Einzelinterpretationen bestehen (Def. 3.15), muß für eine Interpretation mit heterogenen Ontologiedomänen die identifizierende Domänenrelation r mit aufgenommen werden und ist Bestandteil der Interpretation:

Definition 3.16. Für zwei Domänen D_1, D_2 zur Interpretation zweier Ontologien heißt eine Relation $r_{12} : D_1 \rightarrow D_2$ ein *mapping*. [Zimmermann und Euzenat, 2006]

Definition 3.17. Für ein Alignment A_{12} zwischen zwei Ontologien O_1 und O_2 mit zwei Modellen m_1 und m_2 und einer Domänenrelation r_{12} zwischen den Domänen von O_1 und O_2 heißt ein Tripel $\langle m_1, m_2, r_{12} \rangle$ *kontextual verteilte Interpretation*.

Während die vorangehende Definition einer *Interpretation* weder die Axiome der beteiligten Ontologien noch des Alignments beachtet, wird beides für *Modelle eines Alignments* verlangt.

Definition 3.18. Eine kontextual verteilte Interpretation $\langle m_1, m_2, r_{12} \rangle$ eines Alignments A_{12} heißt *kontextual verteiltes Model* gdw.

1. $\langle m_1, m_2, r_{12} \rangle \models A_{12}$ und
2. die Interpretationen m_i sind jeweils lokale Modelle von O_i .

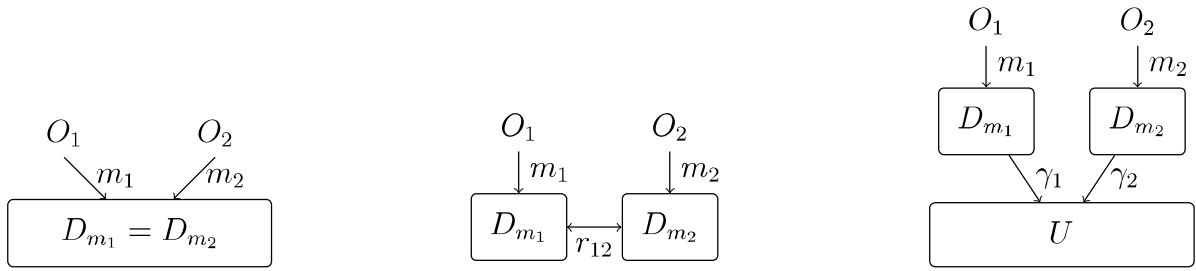


Abbildung 3.4: Domänen der Simple Distributed Semantics, Contextualized Distributed Semantics und Integrated Distributed Semantics (v.l.n.r.).

Integrated Distributed Semantics

Definition 3.19. (Nach [Euzenat und Shvaiko, 2007, S. 52], reduziert auf verteilte Systeme mit zwei Ontologie) Gegeben sei eine Menge M_{12} von Paaren von Interpretation zweier Ontologien O_1 und O_2 sowie eine globalen Domäne \mathcal{U} . M_1 sei der linke, M_2 der rechte Anteil von M_{12} . Sei D_1 die Domäne der Interpretationen M_1 und D_2 die Domänen der Interpretationen M_2 . Die Familie der Funktion $\gamma_1 : D_1 \rightarrow \mathcal{U}$ und $\gamma_2 : D_2 \rightarrow \mathcal{U}$ heißt *Angleichungsfunktion* zwischen den Domänen der Interpretationen M_1 und M_2 und der globalen Domäne \mathcal{U} .

Ähnlich wie in der contextualizes distributed semantics wird in [Euzenat und Shvaiko, 2007, S. 52] implizit (und in 3.19 explizit) von *einer* Domäne für alle Interpretationen einer Ontologie gesprochen. Ohne diese bereits zu Beginn des Abschnitts erwähnte starke Vereinfachung hätte eine Angleichungsfunktion die Struktur einer Funktionenfamilie (für alle beteiligten Ontologien) von Funktionenfamilien (für alle beteiligten Domänen). Angleichungsfunktionen wären dann weder in Theorie, noch in Praxis beherrschbar.

Definition 3.20. (Nach [Euzenat und Shvaiko, 2007, S. 52]) Eine Korrespondenz $c = \langle e_1, e_2, r \rangle$ zwischen Ontologien O_1 und O_2 ist durch zwei Modelle m_1, m_2 erfüllt im Rahmen einer Angleichungsfunktionen (γ_1, γ_2) , kurz

$$m, m' \models_{\gamma_1, \gamma_2} c$$

gdw. m_1 und m_2 lokale Interpretationen von O_1 und O_2 sind, und die durch γ auf eine gemeinsame Domäne abgebildeten Domänen von m_1 und m_2 die Korrespondenz c erfüllen.

Definition 3.21. Ein Angleichungsfunktion und eine Menge von paaren von Interpretationen heißen *integriertes Modell* einer Menge von Korrespondenzen, wenn jede Korrespondenz durch ein Paar von Modellen erfüllbar ist, dessen Bestandteile nicht nur lokale Interpretationen, sondern lokale Modelle ihrer Ontologien sind.

Da sich beide letzten Semantiken in ihren Eigenschaften nur geringfügig unterscheiden, soll im Rahmen dieser Arbeit exemplarisch lediglich die Contextualized Distributed Semantics aus strukturalistischer Sicht betrachtet werden. Eine schematische Gegenüberstellung der drei hier erwähnten Semantiken für Alignments findet sich in Abb. 3.4.

3.4 Strukturalistische Rekonstruktion verteilter Ontologien

Werden Informationssysteme auf Basis verschiedener Ontologien oder Theorien durch Brückengesetze in Relation gebracht, eröffnet sich die Frage nach einer Semantik für Brückengesetze. In den extensionalen, an formaler Logik orientierten Semantiken werden Axiome auf Mengenbeziehungen zwischen Begriffsumfängen abgebildet [Tarski, 1983]. Eine daran orientierte Semantik für Brückenstrukturen gestaltet sich aus zwei Gründen schwierig: 1) Da durch jede Ontologie erst spezifiziert wird, was – im Sinne ihres Commitments – existiert [Moulines, 1994], lassen sich die Extensionen der beteiligten Ontologien nicht ohne weiteres in Verbindung setzen. 2) Im Fall von Informationssystemen, deren zugrundeliegenden Ontologien verknüpft werden sollen, liegen in der Regel in jedem System bereits Gegenstände in Form eines ausgewählten Modells bzw. einer Datenbank fest. Diese werde noch nicht dadurch identifiziert, daß beide beteiligten Ontologien vereinigt werden. Mit Hilfe der Brückenkonzeption des wissenschaftstheoretischen Strukturalismus lassen sich die grundsätzlichen Problemstellungen, als auch die teils impliziten Annahmen vorhandener Lösungen formalisieren.

3.4.1 Rekonstruktion von ontologischen Sprachmitteln

Namensräume

Gegeben seien zwei Ontologien $\mathcal{O} = \langle N_C, N_R, N_I, AL_C, AL_R, I, R, A \rangle$ und $\mathcal{O}' = \langle N'_C, N'_R, N'_I, AL'_C, AL'_R, I', R', A' \rangle$, wobei beide Gebrauch von Namen N eines Namensraums machen, $N = (N_C \cup N_R \cup N_I) \cap (N'_C \cup N'_R \cup N'_I)$. Gemeinsam verwendete Namen $n \in N$ können nicht als gleich aufgefaßt werden, indem ihre Extensionen identisch sind (in der Art $\mathcal{I}_{\mathcal{O}}(n) = \mathcal{I}_{\mathcal{O}'}(n)$), da die Extension eines Begriffs abhängig von einer Interpretation ist. Beide Ontologien besitzen jedoch verschiedene Modellmengen unterschiedlicher Signatur. Werden die Ontologien \mathcal{O} und \mathcal{O}' als Theorieelemente T und T' interpretiert, hat die Verwendung gemeinsamer Namen keine Auswirkung auf die Modellmengen beider Theorieelemente. Sollen innerhalb einer Anwendung beider Ontologien die verwendeten gemeinsamen Namen tatsächlich dieselbe Referenz besitzen, müssen T und T' als ein Theorieholon dargestellt werden. Der dann zwischen T und T' bestehende *Link* vermittelt zwischen potentiellen Modellen aus $M_p(T)$ und $M_p(T')$ und setzt diese *term by term* ins Verhältnis.

Damit läßt sich die Verwendung von gemeinsamen Namensräumen über verschiedene Ontologien hinweg, als *Ontology-Alignment* lesen. Zwei Ontologien in welchen dieselben Namen n Verwendung finden, besitzen in dieser Darstellung prinzipiell je eigene Namen n und n' , von denen die Referenzen innerhalb einer Anwendung durch ein Alignment $n \equiv n'$ als gleich spezifiziert werden.

Import von Ontologien

Der Import einer Ontologie $\mathcal{O} = \langle N_C, N_R, N_I, AL_C, AL_R, I, R, A \rangle$ durch eine Ontologie $\mathcal{O}' = \langle N'_C, N'_R, N'_I, AL'_C, AL'_R, I', R', A' \rangle$ ist syntaktisch als Vereinigung der \mathcal{O}' -eigenen

Axiome mit denen in \mathcal{O} definiert. Beide Ontologien \mathcal{O} und \mathcal{O}' haben damit im Allgemeinen unterschiedliche Signaturen $\langle N_C, N_R, N_I, AL_C, AL_R \rangle$ und $\langle N'_C, N'_R, N'_I, AL'_C, AL'_R \rangle$. Werden die Ontologien \mathcal{O} und \mathcal{O}' als Theorieelemente T und T' interpretiert, folgt daraus ein unterschiedlicher Strukturtyp von potentiellen Modellen $M_p(T)$ und $M_p(T')$. Dabei lassen sich die potentiellen Modelle $M_p(T')$ der importierenden Ontologie als Erweiterung der potentiellen Modelle der $M_p(T)$ importierten Modelle verstehen, bzw. läßt sich die Menge der potentiellen Modelle $M_p(T')$ auf die Menge $M_p(T)$ projizieren. Da die Ontologie \mathcal{O}' neben der Signaturerweiterung gegenüber \mathcal{O} auch zusätzliche Restriktionen $R' \supset R$ beinhalten darf, gibt es Auswirkungen auf die Modell-sein-Eigenschaft von Interpretationen: Ein potentielles Modell $m \in M_p(T)$, das auch aktuelles Modell $m \in M(T)$ heißt, und das durch Termeinführungen $I' \setminus I$ eine Erweiterung zu einem potentiellen Modell $m' \in M_p(T')$ erfährt, kann auf Grund von Restriktionen $R' \setminus R$ außerhalb von $M(T)$ liegen, seine Aktualheits-Eigenschaft also verlieren. Umgekehrt werden aktuelle Modelle $M(T')$ immer auf aktuelle Modelle $M(T)$ projiziert. Bezüglich des Links $\mathcal{L} = M_p(T') \times M_p(T)$ legt dieses Entailment eine Reduktionsbeziehung zwischen der reduzierten Theorie T und der reduzierenden Theorie T' nahe. Um die skizzierten Überlagerungen von Erweiterungen durch Termeinführungen $I' \setminus I$ und Spezialisierungen durch Restriktionen $R' \setminus R$ zu vermeiden, empfiehlt sich an Stelle des Ontologie-Imports eine funktionale Verknüpfung von Ontologien.

3.4.2 Rekonstruktion von Funktionen der Verknüpfung

Erweiterung einer Ontologie

Faßt man eine Ontologie O als Theorieelement T und eine durch Erweiterung des Vokabulars von O hervorgegangene Ontologie O' als Theorieelement T' , auf, läßt sich zunächst feststellen, daß die Modelle aus $M_p(T)$ und $M_p(T')$ strukturell verschieden und $M_p(T)$ sowie $M_p(T')$ disjunkt sind. Ähnlich der Restriktion von potentiellen Modellen eines Theorieelements auf partiell potentielle Modelle, läßt sich jedoch eine Projektionsfunktion für Signaturerweiterungen bei Ontologien angeben.

Definition 3.22. Seien die Ontologien O und O' rekonstruiert durch Theorieelemente T und T' . Sei weiterhin b_T die Funktion, welche einem Modell $m' \in M_p(T')$ ein Modell $m \in M_p(T)$ zuordnet, das um all jene Relationen beschnitten wurde, die nicht in T vorkommen und ist \bar{b}_T die Funktion, welche den übergebenen Modellmengen eine Modellmenge mit elementweise applizierten b_T zuordnet. Dann heiße O' Ontologieerweiterung von O gdw.

$$M_p(T) = \bar{b}_T(M_p(T')).$$

Da die Erweiterung einer Ontologie durch Termeinführungen nicht-kreativ ist, haben Erweiterungen keinen Einfluß auf die Aktualheitseigenschaft potentieller Modelle. Damit gilt für Erweiterungen einer Ontologie O durch O' auch

$$M(T) = \bar{b}_T(M(T')).$$

Spezialisierung

Wie im Sinne der strengen Spezialisierungsrelation des Strukturalismus werden durch die Spezialisierung einer bestehenden Ontologie keine neuen Terme eingeführt, sondern es werden lediglich bestehende Terme durch zusätzliche Axiome enger definiert. Wird eine Ontologie $\mathcal{O} = \langle N_C, N_R, N_I, AL_C, AL_R, I, R, A \rangle$ zu einer Ontologie $\mathcal{O}' = \langle N'_C, N'_R, N'_I, AL'_C, AL'_R, I', R', A' \rangle$ spezialisiert, bleiben deren Signaturen $\langle N_C, N_R, N_I, AL_C, AL_R \rangle$ und $\langle N'_C, N'_R, N'_I, AL'_C, AL'_R \rangle$ unverändert: $N_C = N'_C$, $N_R = N'_R$, $N_I = N'_I$, $AL_C = AL'_C$, $AL_R = AL'_R$. Werden die Ontologien \mathcal{O} und \mathcal{O}' durch Theorieelemente T und T' rekonstruiert, ergeben sich zwei gleiche Mengen potentieller Modelle $M_p(T) = M_p(T')$. Die Brückenstruktur $\mathcal{L} \subseteq M_p(T') \times M_p(T)$ zwischen beiden Theorien ist damit eine Theoriespezialisierung. Die transitive Hülle aller in in Spezialisierung stehenden Theorien bildet ein Theorienetz.

Verwendung

Bei *Verwendung* einer fremden Ontologie \mathcal{O} durch eine verwendende Ontologie \mathcal{O}' werden in \mathcal{O}' neue Klassen und Rollen bzw. bestehende Klassen und Rollen strenger definiert, wobei auf Namen, welche in \mathcal{O} definiert sind, zurückgegriffen wird.

Eine modelltheoretische Semantik der Verwendung von Ontologien hängt davon ab, durch welches Sprachmittel in \mathcal{O}' auf Elemente aus \mathcal{O} verwiesen wird. Da die Überlagerung der möglichen Nebenwirkungen durch Ontologie-Importe eine Betrachtung der eigentlichen Verwendung stark stören, soll im weiteren die Verwendung von Elementen einer fremden Ontologie durch Namensräume betrachtet werden.

Gemäß der Charakterisierung von gemeinsamen Namensräumen handelt es sich bei der Brücke zwischen den Theorieelementen T (in Rekonstruktion von \mathcal{O}) und T' (in Rekonstruktion von \mathcal{O}') um einen *determining link*. Eine weitere wichtige Eigenschaft in der Semantik der Ontologie-Verwendung ist, daß Axiome aus \mathcal{O}' keinen Einfluß auf die Definition der verwendeten Vokabeln in \mathcal{O} haben. Außerdem ist die verwendende Ontologie \mathcal{O}' bereits eigenständig verwendbar. Eine Ontologie über elektrische Bauteile ist für ihre Domäne adäquat, ohne daß die in ihr verwendeten physikalischen Standardgrößen genauer spezifiziert worden. Die wissenschaftstheoretische Entsprechung in Form einer speziellen Brücke zwischen zwei Elementen T und T' ist die der *Theoretisierung*. Die in T' verwendeten Größen werden in T expliziert. Terme, die in T' keine direkt empirisch beobachtbare Referenz haben (theoretische Terme), werden unter Rückgriff auf eine Theorie, in der dieselben Terme direkter meßbarer Gegenstand sind (nicht-theoretische Terme), theoretisiert.

Approximation bei Ontologien

Quantitative Größen wie sie zum Beispiel in physikalischen Theorien eine zentrale Rolle spielen, haben in Ontologien dagegen nur eine untergeordnete Bedeutung. Zwar können – wie in OWL – Individuen Zuhilfenahmeigenschaften besitzen (als *datatype property*), jene Größen lassen sich jedoch nicht zur Konstitution von Klassen nutzen. Haben beispielsweise in einer Fahrzeugontologie Fahrzeuge eine Eigenschaft *Gewicht*, ist es in den gängigen

Ontologieformalismen nicht möglich, eine Klasse der leichten Autos anhand eines Gewichtsschwellwertes zu deklarieren. Eine qualitative Approximation innerhalb von Ontologien vorzunehmen, bedeutet, unscharfe Verhältnisse zwischen Konzepten zu formulieren. Dies entspricht selten den Bedürfnissen an Ontologieformalismen und ist in den einschlägigen Formalismen nicht ausdrückbar.

Anders als innerhalb verhält es sich im Verhältnis zwischen Ontologien. Eine qualitative Approximationen, das heißt die graduelle Ausprägung von Axiomen ist dort formulierbar. Approximative Verhältnisse werden daher im Abschnitt zu *Ontology Alignments* näher betrachtet. Da Theoriereduktion auf dem Reduktionsbegriff aufbaut, soll sie im Abschnitt 3.4.3 zu *Ontology Alignments* thematisiert werden.

Minimales vs. maximales ontologisches Commitment

Gruber definiert mit dem minimalen *ontologischen commitment* ein Designprinzip für formale Ontologien:

„*Minimal ontological commitment*: 1) An ontology should require the minimal ontological commitment sufficient to support the intended knowledge sharing activities. 2) An ontology should make as few claims as possible about the world being modeled. [...] 3) Ontological commitment can be minimized by specifying the weakest theory (allowing the most models) and 4) defining only those terms that are essential to the communication of knowledge consistent with that theory.“ [Gruber, 1993a, S. 909f]

Von zwei Ontologien \mathcal{O} und \mathcal{O}' ist danach diejenige zu bevorzugen, die schwächer aber für die Kommunikation noch adäquat ist. Da dies neben der Minimalität von Annahmen auch die Minimalität von Namen einschließt, können \mathcal{O} und \mathcal{O}' unterschiedliche Signaturen besitzen. Eine einfache formale Rekonstruktion durch ein Verhältnis von Modellmengen scheidet dadurch aber aus. Seien \mathcal{O} und \mathcal{O}' durch Theorieelemente T und T' rekonstruiert, dann ist gemäß Gruber die Ontologie zu bevorzugen, die durch die schwächere Theorie (im Sinne von Definition 3.5) rekonstruiert wird. Während naturwissenschaftliche Forschung in der Regel *starke*, stark determinierende Theorien bevorzugt, ist das Designprinzip der minimalen ontologischen Commitments an möglichst schwachen, schwach determinierenden Ontologien interessiert. Beide Interessen, nach starker Determinierung und breiter Kommunikationsbasis, werden im Konzept des Theorienetzes berücksichtigt. Während das Fundamentelement eines Theorienetzes ontologisch minimal sein sollte, kann in den Blättern des Theorienetzes wenn nötig eine differenzierte Stärkung durch zusätzliche Annahmen erfolgen (siehe Kapitel 4).

3.4.3 Rekonstruktion von *Ontology Alignments*

„Consider two theories, T and T' , which are both empirically adequate inside domain D' . In this case the demand may arise to explain T' on the basis of T , i.e. to derive T' from T .“

(Feyerabend 1962, S.75)

Das Problem der Unbestimmtheit der Übersetzung Begegnet man in einer fremden Sprache dem Wort ‚Gavagai‘ stets in Zusammenhang mit einem tatsächlichen Hasen, ist man nach [van Quine, 1980] nicht ohne weiteres berechtigt, ‚gavagai‘ mit ‚Hase‘ zu übersetzen. Vielmehr könnte die fremdsprachliche Bedeutung auch ‚unabgetrenntes Hasenteil‘ oder ‚Hasenstadium‘ oder ein ‚auf zur Jagd‘ sein. Übertragen auf Ontologien – verstanden als Spezifikationen von Sprachgebrauch – stehen sich zwei Gebräuche von Sprache in Form ihrer je eigenen Ontologien gegenüber. Es stellt sich für Ontologien das analoge Problem, unter welchen Bedingungen zwei Ontologieelemente (z.B. ‚Hase‘ und ‚gavagai‘) als äquivalent erachtet werden können. Selbst wenn in einer Sprachverwendung beide Worte zusammenfallen, also zwei Terme innerhalb von zwei Modellen die gleiche Extension aufweisen (wie beispielsweise ‚Hase‘ und ‚gavagai‘), kann noch nicht auf die extensionale Gleichheit in allen Sprachanwendungen (beziehungsweise Modellen) geschlossen werden. Eine Übersetzung zweier Sprachen zu finden, heißt übertragen, ein Alignment zwischen zwei Ontologien zu finden. Quine hält diese Problemstellung aufgrund ihrer generellen Unterbestimmtheit – selbst unter mehrmaliger Wiederholung – für unauflösbar.

„Es gibt kein offenkundiges Kriterium, nach dem man solche Effekte ausschalten und die eigentliche Bedeutung von ‚Gavagai‘ herausbekommen kann – was immer die eigentliche Bedeutung sein mag.“ [van Quine, 1980, S. 79]

Wenn eine strukturalistische Rekonstruktion von Alignments die prinzipielle Schwierigkeit von Übersetzung auch nicht beseitigen kann, läßt sich wenigstens angeben, welche Annahmen mindestens getroffen werden müssen, um die Unbestimmtheit der Übersetzung aufzulösen.

„Vollständige radikale Übersetzung findet statt, und ohne analytische Hypothesen kommt sie nicht aus. [...] Ebenso wie wir nur in den Begriff einer Theorie oder eines Begriffsschemas sinnvoll von der Wahrheit eines Satzes sprechen können, so kann alles in allem auch nur im Rahmen eines bestimmten Systems analytischer Hypothesen von zwischensprachlicher Synonymie sinnvoll die Rede sein.“ [van Quine, 1980, S. 141]

Dazu werden im Folgenden die in Abschnitt 3.3.3 beschriebenen, bestehenden Semantiken im strukturalistischen Framework rekonstruiert.

Lokale Semantik

Als Ausgangspunkt für eine Rekonstruktion der Semantik von Alignments soll zunächst die Semantik von Ontologien im Zusammenhang mit Alignments strukturalistisch dargestellt werden. Die wesentliche, im Rahmen von Alignments angepaßte Semantik besteht in der Vorinterpretation einer Domäne.

Sei $\mathcal{O} = \langle N_C, N_R, N_I, AL_C, AL_R, I, R, A \rangle$ eine Ontologie, rekonstruiert als Theorieelement T im Sinne von Kapitel 2. Zusätzlich gelten für Ontologien in den betrachteten Alignment-Semantiken zwei implizite Annahmen: Zum einen a) teilen sich alle Interpretationen $\mathcal{I} = \langle D, \cdot^{\mathcal{I}} \rangle$ von \mathcal{O} dieselbe Domäne D , zum anderen b) ist D die empirische Domäne, die der Konzeptionalisierung zugrundegelegt wird. Das Reden von ‚derselben

Domäne‘ über verschiedene Interpretationen hinweg ist problematisch, so lange ungeklärt ist, wann zwei Domänen ‚dieselben‘ sind. Identität wird im weiteren Verlauf gemäß dem Extensionalitätsprinzip als Gleichheit in allen Eigenschaften (im Rahmen einer Konzeptionalisierung bzw. Ontologie) verstanden.

Diese Annahmen können im strukturalistischen Framework formal ausgedrückt werden. In der strukturalistischen Theorieauffassung entspricht jedes Modell einem eigenständigen möglichen Anwendungsfall. Die Domänen können damit zwar überlappen und gemeinsame Individuen umfassen (was auch immer diese Identität konstituiert), jedoch brauchen die *Eigenschaften* dieser Individuen innerhalb verschiedener Modelle nicht gleich sein. Dennoch kann ein Zusammenhang zwischen den lokalen Modellen ausgedrückt werden, mit dem die Einzeldomänen der lokalen Modelle als geteilte, gemeinsame Domäne im Sinne von (a) verstanden werden können. Formal wird das in einem speziellen Constraint, dem *Identitätsconstraint* C_{id} ausgedrückt. Darin werden jeweils solche Modelle als eine Menge zusammengefaßt, in denen eine Eigenschaftsgleichheit zwischen den als identisch verstandenen Gegenständen herrscht. Die Modelle $m = \langle D_1, \dots, D_n; \dots \rangle \in X$ eines Constraints $X \in C$ werden dadurch zu einer (virtuellen) gemeinsamen Domäne verschmolzen. Für je eine Eigenschaft e aus Eigenschaften E läßt sich ein Identitätsconstraint C_{id} axiomatisch formulieren (vgl. 2.9):

$$C_{id}(T) := \bigcap_{e \in E} \left\{ X \subseteq M_p(T) : X \neq \emptyset \wedge \bigwedge_{x,y \in X} \bigwedge_{d \in D_x \cap D_y} e^x(d) = e^y(d) \right\}$$

Dabei bezeichnet $e^x(d)$ die e genannte Eigenschaft des Gegenstandes d im Modell x und D_x die Domäne über der die Eigenschaft e ausgesagt wird. $C_{id}(T)$ umfaßt alle Mengen potentieller Modelle, in denen gleiche Gegenstände auch in ihren Eigenschaften übereinstimmen. Durch die Modelle $c \subseteq C_{id}(T)$ wird je eine Domäne mit über gleichen Gegenständen invarianten Eigenschaften beschrieben.

Die Annahme (b) zeichnet ein konkretes Element $c \in C_{id}(T)$ als empirisch relevant aus. Von ihnen ist im Verständnis von den genannten Alignments nur eine von Interesse – nämlich die empirische Domäne. Die empirische Domäne wird im Strukturalismus von den intendierten Anwendungen $i \in I$ geteilt. Daß die Ontologie über der empirischen Domäne interpretiert wird, drückt der Strukturalist als Teil der theoretischen Behauptung einer Theorie aus

$$I \in C.$$

Simple Distributed Semantics

Die strukturalistische Entsprechung eines Alignments A zwischen n Ontologien ist ein Link \mathcal{L} zwischen den potentiellen Modellen von n Theorieelementen T_1 bis T_n mit $\mathcal{L} \subseteq M_p(T_1) \times \dots \times M_p(T_n)$. Die Schwierigkeit, einer Korrespondenz $C \equiv C'$ eine extensionale Semantik zu geben, besteht darin, daß erstens die Extension von C (wie von C') in jedem potentiellen Modell eine andere ist, da insbesondere die Domäne, als deren Teilmenge sie dargestellt wird, in jedem Modell eine andere ist. Betrachtet man ausschnittsweise zwei potentielle Modelle $m \in M_p(T)$ und $m' \in M_p(T')$, kann zweitens ein direktes Verhältnis

deren Extensionen, der Art $C^m = C^{m'}$, nicht hergestellt werden, da beide Extensionen Teilmengen verschiedener Basismengen sind. Die Interpretation von Alignments gemäß der *simple distributed semantics* geschieht daher unter der Annahme einer *gemeinsamen* Domäne der verknüpften Ontologien. Wie im vorangehenden Abschnitt soll die Gleichheit von Domänen gemäß dem Extensionalitätsprinzip die Gleichheit aller Gegenstände im Rahmen einer Konzeptionalisierung bedeuten – jedoch über mehrere Ontologien hinweg.

Modelle eines Alignments nach Def. 3.15) sind Paare lokaler Modelle. Modelle eines Alignments bündeln damit den gesamten Gehalt des verteilten Systems – sie erfüllen die Axiome der lokalen Ontologien und alle Korrespondenzen. Die Interpretation eines Alignments durch Paare von Modellen entspricht der Darstellung von Brückengesetzen durch Links. Im Gegensatz zu Alignment-Modellen repräsentiert ein Link jedoch nur die Brückenaxiome ohne Beachtung des Aussagengehaltes der Einzeltheorien. Die Bündelung aller Aussagentypen erfolgt im Strukturalismus nicht auf der Ebene des Links, sondern auf Ebene des Theorieelements. Der Anwender versucht die Anwendung eines Theorieelements auf eine intendierte Anwendung, nicht aber die Anwendung eines Brückengesetzes auf eine Anwendung. Die Semantik des Links braucht Gesetzmäßigkeiten der Einzeltheorien damit noch nicht abzubilden. Dafür muß der Gehalt des Links auf die beteiligten Theorieelemente abgebildet werden. Dies geschieht durch eine Projektion – dem sogenannten *lokalen Anteil am globalen Link*.

Definition 3.23. Sei \mathcal{L} ein n -stelliger Link zwischen den Theorieelementen T_1, \dots, T_n . Der lokale Link $L(T_i)$ für ein beteiligtes Theorieelement

$$T_i = \langle M_p(T_i), M(T_i), C(T_i), L(T_i), I(T_i) \rangle$$

ist definiert durch:

$$L(T_i) = \{m_i \in M_p(T_i) : \forall j \neq i \exists m_j \in M_p(T_j) : \langle m_1, m_2, \dots, m_n \rangle \in \mathcal{L}\}$$

Dieser entspricht noch den *local models of an alignment modulo einer Ontologie* bei Zimmermann und Euzenat [2006, S. 20].

In der strukturalistischen Auffassung werden Axiome des Theorieelementes und des Links erst im *theoretischen Gehalt* $TG(T) = P(M(T)) \cap P(L(T)) \cap C(T)$ eines Theorieelementes T zusammengeführt und erst dieser ($TG(T)$) mit den intendierten Anwendungen verknüpft: $I(T) \in TG(T)$. Dagegen wird in der Simple Distributed Semantic die empirische Domäne I bereits in den Modellen jeder Ontologien erzwungen: $M(T) \subseteq I(T)$.

Die wesentliche Eigenschaft der einfachen verteilten Semantik ist die Identität aller Domänen zur Interpretation der involvierten Ontologien. Würde Identität der Domänen expliziert als Identität bezüglich von Eigenschaften, hieße das, schematisch gesprochen: $I(T_1) = \dots = I(T_n)$. Sobald die T_1 bis T_n (genauso wie O_1 bis O_n) unterschiedliche Signaturen besitzen, wird diese Forderung indes unerfüllbar. Mit unterschiedlichen Signaturen bedürfte es erst eines Alignments, um die Identität von Gegenständen und damit von identischen Domänen festzustellen. Damit bedürfte die Evaluierung eines Alignments im Sinne einer Semantik bereits der Annahme des Alignments.

Das Trilemma naiver verteilter Semantiken: Naive verteilte Semantiken wie die *simple distributed semantics* lassen sich nicht vollständig formalisieren, da bereits ihre Voraussetzungen unvollständig oder widersprüchlich sind:

1. Die durch ein Alignment verknüpften Ontologien besitzen eine unterschiedliche Signatur.
2. Die durch ein Alignment verknüpften Ontologien besitzen identische Domänen.
3. Die Identität von Domänen ist gemäß Extensionalitätsprinzip gegeben, wenn für jeden Gegenstand ein in allen Eigenschaften gleicher Gegenstand in jeder anderen Domänen existiert.

Obwohl jeder der drei Voraussetzungen notwendiger Teil der Vorstellung einer *simple distributed semantics* ist, können nicht alle Voraussetzungen gleichzeitig angenommen werden. Während die Eigenschaften 1. und 2. die *simple distributed semantics* explizit konstituieren, wird Eigenschaft 3. zwar nicht explizit geführt, jedoch verläßt jedes andere Sprechen von identischen Domänen den positivistischen Rahmen und ist nicht mehr formal explizierbar. Da die Eigenschaften 1. bis 3. nicht gemeinsam angenommen werden können, ist die *simple distributed semantics* im Sinne von 1. bis 3. ist nicht formal definierbar.

Verteilte Semantiken

Im Fall der Contextualized Distributed Semantic wird nicht davon ausgegangen, daß die Domänen zweier Ontologien gleich sind. Andererseits ist ein Alignment zwischen zwei Ontologien nicht sinnvoll, wenn die verknüpften Ontologien – in einem noch zu klärenden Begriff – inkompatibel sind. Die Domänen eines Alignment-Modells sind demnach nicht identisch aber auch nicht grundverschieden. Die Identifizierung zwischen den Domänen der Interpretationen verschiedener Ontologien erfolgt in der Contextualized Distributed Semantics durch die Domänenrelation. Die Eigenschaften und Verhältnisse zwischen Gegenständen, Interpretationen, Ontologien und Domänenrelation schlagen sich in spezifischen Verhältnissen der strukturalistischen Rekonstruktion wieder. Seien O und O' Ontologien, verknüpft durch ein Alignment A , wobei die Ontologie O auf O' abgebildet werden soll. Seien ferner $M = \{m : m \models O\}$ und $M' = \{m : m \models O'\}$ die Mengen lokaler Modelle der Ontologien O und O' . Das Alignment A werde bezüglich einer Relation r durch eine Menge von Modellpaaren $M_A \subseteq M \times M'$ interpretiert, wobei A durch Elemente aus M_A bezüglich r erfüllt wird. Die Relation r ist im Allgemeinen von der Übersetzungsrichtung von O nach O' abhängig [?, S. 167]. In der strukturalistischen Rekonstruktion seien O und O' rekonstruiert als Theoricelemente T und T' , das Alignment A werde interpretiert durch einen Link L über potentiellen Modellen von T und T' . An einer strukturalistische Rekonstruktion von Alignments lassen sich die wesentlichen Eigenschaften von deren verteilten Semantiken ablesen:

1. Um nicht für jede Kombination lokaler Modelle aus $M \times M'$ mit ihren je eigenen Domänen eine Relation r angeben zu müssen, werden jeweils nur Modelle aus M und M' über intendierten Domänen D und D' betrachtet. In der strukturalistischen

Rekonstruktion werden Domänen als Elemente aus der Menge der (Identitäts-)Constraints $C_{id}(T)$ und $C_{id}(T')$ dargestellt. Qua theoretischen Behauptungen modellieren die intendierten Anwendungen $I \in C_{id}(T)$ und $I' \in C_{id}(T')$ je eine intendierte Domäne. Für den Link L ergibt dies eine Einschränkung auf intendierte Anwendungen:

$$\mathcal{L} \subseteq I(T) \times I(T').$$

Da in den intendierten Anwendungen gemäß der theoretischen Behauptung insbesondere die Gesetzhypothesen der Theorien T und T' gelten, gilt außerdem $\mathcal{L} \subseteq M(T) \times M(T')$.

2. Der Zusammenhang r zwischen den Individuen der Domänen D und D' ist im allgemeinen keine Bijektion. Ein Individuum innerhalb einer Domäne kann mehreren Individuen der anderen Domäne entsprechen und umgekehrt. Da wie in Abschnitt 3.4.3 festgestellt, die Domänen beider Ontologien als deren realer Gegenstandsbereiche vorinterpretiert werden und dennoch nicht praktisch aufzählbar sind, ist eine Definition von r durch Aufzählung ausgeschlossen. In Anlehnung an die wissenschaftstheoretische Unterscheidung zwischen *type ontologies*, in denen Eigenschaften zur Definition von Klassen herangezogen werden und *token ontologies* in denen Dinge aufgezählt werden, stellt die Domänenrelation r eine *token by token*-Relation dar. Da Theorien und formale Ontologien *type ontologies* sind [Moulines, 1994], liegt die Idee nahe, stattdessen eine *type by type*-Relation zwischen den Domänen zu definieren. Die Rekonstruktion einer gegebenen *token by token* als *type-by-type* ist möglich:
3. Seien $D_1 \subseteq D$ und $D'_1 \subseteq D'$ die Mengen der Individuen aus den Domänen D und D' , für die r bijektiv ist. In vereinfachter Schreibweise kann der bijektive Zusammenhang zwischen D_1 und D'_1 ausgedrückt durch $D_1 = D'_1$ ausgedrückt werden. Für die übrigen (nicht bijektiv abbildbaren) Individuen gilt: Angenommen, einige Individuen D_2 aus D werden in D' qua r durch eine Verbindung aus zwei Individuen aus D'_2 und D'_3 eineindeutig abgebildet. Dann gilt in vereinfachter Schreibweise $D_2 = D'_2 \times D'_3$. Verallgemeinert läßt sich so die gesamte Relation r als Menge von Gleichheiten zwischen Leiternmengen über Teilmengen von D und D' beschreiben. In der strukturalistischen Darstellung ergibt sich ein Link \mathcal{L} zwischen den Theorieelementen T und der um Entsprechungen zwischen Leiternmengen über Teildomänen zum *Determining Link* angereichert ist.

Zusammenfassung: Die strukturalistische Rekonstruktion eines Alignments A in Contextualized Distributed Semantics durch das eine Ontologie O Kraft einer Domänenrelation r – bestehend aus Modellenpaaren $M_A \subseteq M \times M'$ (von O und O') – in eine Ontologie O' übersetzt werden kann, ist ein *determining link* $\mathcal{L} \subseteq I \times I'$. Die Ontologien O und O' werden durch Theorieelemente $T = \langle K, I \rangle$ und $T' = \langle K', I' \rangle$ samt Identitätsconstraint C_{id} , die Relation r wird durch Domänenzuordnungen des *determining links* und die den Link erfüllenden Modelle M_A als Teilmenge von $I \times I'$ rekonstruiert.

Beobachtung: Die Rekonstruktion der Domänenzuordnungen – also zum Beispiel $D_2 = D'_2 \times D'_3$ – erfolgt entlang einer Partitionierung der Domänenrelation r . Werden Ontologien O und O' bereits in ihrer Rekonstruktion als Theorieelemente T und T' in verschiedenen Domänen D_1, \dots, D_i für $M_p(T) = \{\langle D_1, \dots, D_i; A_1, \dots, A_j; \dots \rangle, \dots\}$ und D'_1, \dots, D'_i für $M_p(T') = \{\langle D'_1, \dots, D'_i; A'_1, \dots, A'_j; \dots \rangle, \dots\}$ rekonstruiert, ist die Rekonstruktion der Menge der Domänenzuordnungen unabhängig von einer gegebenen Domänenrelation r möglich. Damit kann auf die Voraussetzung nur einer einzigen intendierten Domänenrelation r und schließlich auf die Voraussetzung nur je einer intendierten Domäne für Interpretationen von O und O' verzichtet werden. Eine solche Semantik von *ontology alignments* nach strukturalistischer Art wird im folgenden Abschnitt vorgestellt.

3.5 Eine Strukturalistische Semantik für Terminologische Verknüpfungen

Alignments als Reduktion

Im Folgenden soll aufbauend auf dem Konzept der *ontologischen* Reduktionen eine eigene Semantik für Alignments zwischen zwei Informationssystemen IS und IS' mit Ontologien O und O' entworfen werden. In der strukturalistischen Semantik besitzen Alignments keine Semantik *per se*, sondern in Abhängigkeit ihres Gebrauchs. Dabei werden Anfragen eines lokalen, anfragenden Informationssystems IS an ein entferntes, angefragtes Informationssystem IS' vermittelt, indem die Anfragen im Vokabular der lokalen Ontologie O in das Vokabular einer entfernten Ontologie O' übersetzt werden. Die Verwendung eines Alignments weist in dieser Sichtweise stets einen Informationsfluß – von einem entfernten, zu einem lokalen Informationssystem auf. Die Voraussetzung einer strukturalistischen Interpretation eines Alignments ist eine term-by-term-Relation zwischen den Domänen der involvierten Ontologien.

Definition 3.24. Seien zwei Ontologien O und O' durch zwei Theorieelemente $T = \langle M_p(T), M_{pp}(T), M(T), C(T), L(T), I(T) \rangle$ und $T' = \langle M_p(T'), M_{pp}(T'), M(T'), C(T'), L(T'), I(T') \rangle$ rekonstruiert. Die potentiellen Modelle in $M_p(T)$ und $M_p(T')$ seien von der Struktur $\langle D_1, \dots, D_i; A_1, \dots, A_j; R_1, \dots, R_k \rangle$ bzw. $\langle D'_1, \dots, D'_i; A'_1, \dots, A'_j; R'_1, \dots, R'_k \rangle$. Gelten für die Domänen D_1, \dots, D_i und D'_1, \dots, D'_i Verhältnisse der Form $D_l \in S(D'_1, \dots, D'_i)$ oder $D'_l \in S(D_1, \dots, D_i)$, heißen die Echelonmengen-Inklusionsbildungsvorschrift *Domäneninklusionen*.

Eine Inklusionsbeziehung $D_i \subseteq D'_j$ besteht, wenn D_i ein Unterbegriff von D'_j ist, der allgemeinere Fall, $D_i \in S(D'_1, \dots, D'_n)$ wenn sich D_i nur als Kombination von Domänen D_1, \dots, D_n darstellen läßt.

Ein Beispiel für ein einfaches Inklusionsverhältnis $D \subseteq D'$ besteht in einer Domäne D der Weine und einer Domäne D' der alkoholischen Getränke. Ein Beispiel für eine komplexe Echelon-Mengen-Inklusion ist eine Domäne D von Adressen und Domänen D'_1 für Straßen, D'_2 für Orte, usw.. In dieser Situation kann kein Gegenstand der einen Domäne D einem Gegenstand einer anderen Domäne D'_1 oder D'_2 zugeordnet werden, wohl aber einer Kombination aus Gegenständen – $D \subseteq D'_1 \times D'_2$.

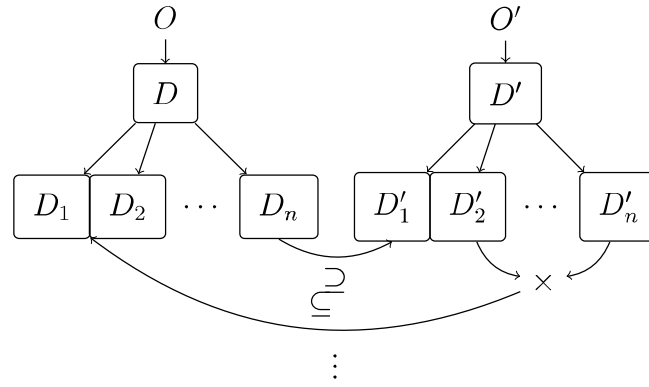


Abbildung 3.5: Schema der Struktur zur strukturalistischen Interpretation eines Alignments.

Als Voraussetzung für die Strukturalistische Interpretation eines Alignments zwischen zwei Ontologien ist eine möglichst große *Menge von Inklusionsbeziehungen* aufzustellen. Möglichst jede Domäne der D_1, \dots, D_i soll dafür als Teilmenge einer Echelon-Menge der Mengen $D'_1, \dots, D'_{i'}$ dargestellt werden und umgekehrt. Die Struktur, in der zwei Modelle Modell eines Alignments genannt werden, ist in Abb. 3.5 schematisiert.

Bereits anhand der Menge von Domänenrelationen kann nun – in Anlehnung an strukturalistische Theorien – definiert werden, wann zwei formale Ontologien kompatibel sind:

Definition 3.25. Zwei Ontologien heißen ontologisch kompatibel gdw. die Menge ihrer Domäneninklusionen nicht leer ist.

Dies ist Fall, wenn mindestens ein Paar von Gegenstandstypen existiert, die in einem Projektions- bzw. Inklusionsverhältnis stehen. Damit ist ontologische Kompatibilität genau die spezifische Eigenschaft, mit der eine allgemeine Reduktion zur ontologischen Reduktion wird.

Unter Verwendung einer Menge von Domäneninklusionen kann nun definiert werden, wann zwei Modelle m und m' eine Korrespondenz erfüllen. Die Strukturalistische Rekonstruktion T und T' der Ontologien O und O' unterscheidet an Stelle von Interpretationen $\mathcal{I} = \langle D, \cdot^{\mathcal{I}} \rangle$ in einer Domäne D , unterschiedliche Einzeldomänen D_1, \dots, D_i , die kategorialer Natur sind, also den allgemeinsten disjunkten primitiven Konzepten einer Ontologie entsprechen. Daher liegt die Extension eines jeden Ontologieelements e der Ontologie O innerhalb genau einer Einzeldomäne D_l (für Rollen e entsprechend in zwei D_l , $1 \leq l \leq i$). Dem gemäß liegen Extensionen der Ontologieelemente e' der Ontologie O' in genau einer (für Rollen zwei) Einzeldomäne(n) D'_m , $1 \leq m \leq i'$. Für eine Korrespondenz $e R e'$ liegt damit e innerhalb einer Domäne D_l und e' in einer Domäne D'_m . Um eine Korrespondenz zu interpretieren, müssen die Entitäten einer Korrespondenz jedoch in einer gemeinsamen Domäne interpretiert werden. Ob das in einer Domäne D_1, \dots, D_i von O oder einer Domäne $D'_1, \dots, D'_{i'}$ von O' geschieht, hängt davon ab, in welchem Informationssystem die Interpretation erfolgt. Interpretiert wird stets in der Domäne des importierenden Informationssystems (in der laufenden Darstellung IS' bzw. O'). Die Interpretation der Korrespondenz $e R e'$ erfolgt damit in einer Domäne D'_m .

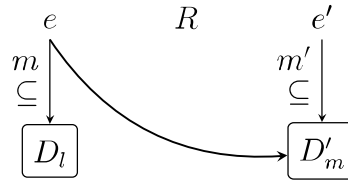


Figure 3.6: Die Interpretation einer Korrespondenz $e R e'$.

Die allgemeine Idee der Substitution einer fremden durch eine lokale Domäne, ist in Abbildung 3.6 veranschaulicht.

Die verschiedenen Verhältnisse zwischen Domäneninklusion und Informationsfluß lassen sich wie folgt systematisieren und behandeln. Abhängig von den Inklusionsverhältnissen zwischen D_i und D'_j können die folgenden disjunkten Fälle eintreten.

1. *Es gilt $D_i \subseteq D'_j$.* Da jedes Element von D_i auch Element von D'_j ist, bewegt sich die mögliche Extension von e stets innerhalb von D'_j . e besitzt damit die selbe Domäne wie e' . Unter dieser Bedingung kann die Interpretation der Korrespondenz gemäß der *simple distributed semantics* nach Def. 3.14 erfolgen.

Zusätzliche Vorbedingung: $\{\}$

2. *Es gilt $D'_j \subseteq D_i$.* Hier kann es vorkommen, daß sich Individuen aus der importierten Domäne D_i in D'_j nicht interpretieren lassen – nämlich gerade diejenigen, die kein Element von D'_j sind. Damit läuft der Gegenstandsbereich von e nicht innerhalb dessen von e' . Soll später Wissen einer Wissensbasis in dieser Richtung transferiert werden, kann es zu einer Überschreitung des intendierten Anwendungsgebietes der importierenden Ontologie kommen. Eine Interpretation im Sinne der *simple distributed semantic* ist daher nicht direkt möglich. Dafür muß zunächst sichergestellt bzw. angenommen werden, daß die Extension von e vollständig in D'_j liegt. Die Bedingung unter der die Interpretation der Korrespondenz sicher in der *simple distributed semantic* erfolgen kann ist:

Zusätzliche Vorbedingung: $e^m \subseteq D'_j$.

3. *Es gilt $D_i \in S(D'_1, \dots, D'_m)$, wobei mindestens zwei der D'_1, \dots, D'_m tatsächlich in $S(D'_1, \dots, D'_m)$ eingehen.* Diese Situation läßt sich veranschaulichen mit einer Domäne D_i von Adressen und Domänen aus D'_1, \dots, D'_m von Straßen, Orten und Postleitzahlen. Auch hier ist eine Interpretation in den Domänen D'_1, \dots, D'_m von O' möglich – Gegenstände in D_i können dafür ontologisch projiziert auf ihren D'_j -Anteil verstanden werden. Mit dieser Zusatzbedingung kann die Interpretation der Korrespondenz wie in (1.) erfolgen.

Zusätzliche Vorbedingung: $p(D_i) \subseteq D'_j$, wobei sich p als Projektion aus der Domänenrelation ergibt.

4. *Es gilt $D'_j \in S(D_1, \dots, D_n)$ wobei mindestens zwei der D_1, \dots, D_n tatsächlich in $S(D_1, \dots, D_n)$ eingehen.* Eine Projektion wie im vorherigen Fall funktioniert hier nicht. Die Domäneninklusion sagt definitiv aus, daß die Extension von e' komplexe

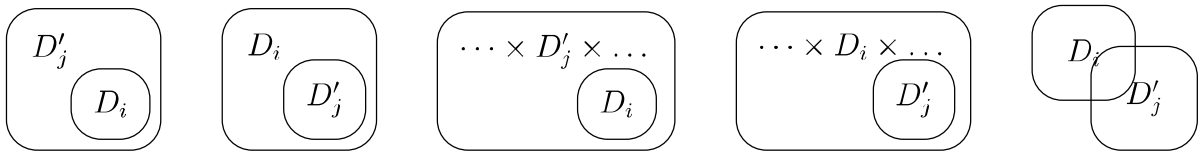


Abbildung 3.7: Fälle (1) bis (5) möglicher Inklusionen zwischen den zwei Domänen D_i und D'_j (von links).

Gegenstände im Sinne der importierten Ontologie O beinhaltet. Bildlich muß ein Gegenstand aus e mit zusätzlichen Gegenständen anderer O -Domänen verquickt werden, um einen e' -Gegenstand zu darzustellen. Im vorherigen Beispiel kann eine Adresse zwar auf eine Straße projiziert werden, umgekehrt jedoch nicht. Eine Korrespondenz dieser Art kann unter Annahme der gegebenen Domäneninklusionen kein Modell besitzen.

Zusätzliche Vorbedingung: unerfüllbar

5. *Sonst:* Zwischen D_i und D'_j besteht in der Domäneninklusion gar kein ausgezeichnetes Verhältnis. Die Domänen D_i und D'_j sind damit ontologisch inkompatibel. Sie können zwar Elemente teilen, sprechen aber dennoch verschiedene Erfahrungsbereiche an. Eine Domäne D der Säugetiere und eine Domäne D' der Vögel besitzt gemeinsame Individuen, jedoch kann auch unter Zuhilfenahme zusätzlicher Eigenschaften keine von beiden aus der je anderen konstruiert werden. Die Interpretation der Korrespondenz fällt dann auf die Schnittmenge $D_i \cap D'_j$ zurück. Dafür muß sichergestellt werden, daß die Extension von e in D'_j liegt und die Extension von e' in D_i . Sollte die Schnittmenge $D_i \cap D'_j$ leer sein, heißt das lediglich, daß die Korrespondenz zum Zweck einer Übersetzung obsolet ist.

Zusätzliche Vorbedingung: $e^m \subseteq D'_j$ und $e^{m'} \subseteq D_i$.

Jeder dieser Fälle spezifiziert gegebenenfalls zusätzliche Vorbedingung (in der Form gegebenenfalls zusätzlicher zu erfüllender Domäneninklusionen) zur Interpretation eines Alignments durch zwei lokale Modelle. Für eine Veranschaulichung siehe Abbildung 3.7. Wenn die Alignment-spezifischen Domäneninklusionen zutreffen, können Daten aus dem entfernten Informationssystem IS auf das lokale Informationssystem IS' reduziert werden. Die Korrespondenz kann dann im Sinne der simple distributed semantics interpretiert werden.

Beispiel:

Das folgende Beispiel zeigt die Schwierigkeiten sowie den strukturalistischen Ansatz zur Interpretation von Alignments in verteilten Semantiken. Seien O und O' Ontologien zur Spezifikation meteorologischer Konzepte. In O sei die Klasse **HighPressureArea** als spezifisches System definiert, in O' ist eine Klasse **Anticyclone** als spezifisches System definiert. Sei A ein Alignment zwischen O und O' mit einer Korrespondenz $\text{HighPressureArea} \equiv \text{Anticyclone}$. Wie kann die Interpretation ohne die Vermischung von Kategorien der *simple distributed semantics* erfolgen? Die Zuordnung zwischen Individuen in Domänen der Interpretationen innerhalb der Kontextual Verteilten Semantik

ist ebenfalls problematisch: Die Beschränkung auf die jeweiligen empirischen Domänen erfordert eine Zuordnung einzelner Phänomene, die praktisch kaum erbracht werden kann.

In der strukturalistischen Semantik werden 1) die Domänen von O und O' analysiert und in der Rekonstruktion als Theorieelement unabhängig voneinander geführt, beispielsweise *System*, *Phenomenon*, *Coordinate*, *Height*, *Time*, *Pressure*. 2) Die jeweiligen Domänen der vorkommenden Ontologieelemente werden bestimmt, z.B. *HighPressureArea* als ein *System* und *Anticyclone* als ein *Phenomenon*. 3) Die Menge von Domäneninklusionen wird nach dem Verhältnis beider Domänen durchsucht, z.B. $System \times Observation \subseteq Phenomenon$. 4) Weil die Domäne *Phenomenon* umfassender ist als die Domäne von *HighPressureArea*, ist es aus Sicht des anfragenden Informationssystems IS' sicher, die Extensionen von *Anticyclone* in der lokalen Domäne *Phenomenon* zu interpretieren. Die Korrespondenz kann damit in dieser Anfragerichtung in der Domäne *Phenomenon* in *simple distributed semantics* interpretiert werden.

Alignments als Übersetzung

Die angegebene Semantik von Ontology Alignments erlaubt die Interpretation von Ontology Alignments. Innerhalb einer Struktur der ontologischen Reduktion kann entschieden werden, ob ein Alignment mit seinen Korrespondenzen erfüllt ist. Damit ein Ontology Alignment als Übersetzung zählt, muß es in seiner Anwendung zusätzlich wahrheitswerterhaltend sein. Diese Eigenschaft läßt sich an der strukturalistischen Rekonstruktion ablesen:

Theorem 3.1. *Seien die folgenden Bedingungen erfüllt:*

1. T und T^* sind (idealisierte) Theorie-Elemente ohne Hilfsmengen und ρ reduziert T direkt auf T^* .
2. L und L^* sind die Sprachen für T und T^* , die bis auf disjunkte Mengen von Sorten und nicht-logischen Symbolen identisch sind.
3. ρ ist isomorph bezüglich der Relationen über den Basismengen und kann durch eine endliche Menge von Axiomen beschrieben werden.
4. Die in T verwendete Logik ist die selbe wie in T^* (die Ableitungsverhältnisse \models innerhalb von T und T^* sind gleich).
5. ρ bildet auf (und nicht nur in) die Menge M_p von T ab.

Dann existiert eine Übersetzungsfunktion $\text{trans} : \text{Sent}(L) \rightarrow \text{Sent}(L^*)$, so daß für alle $x^* \in \text{Dom}(\rho)$ und alle $\alpha \in \text{Sent}(L)$: $x^* \models \text{trans}(\alpha)$ gdw. $\rho(x^*) \models \alpha$. ($\text{Sent}(L)$ seien die Sätze von L) [Balzer u. a., 1987, S. 311].

Läßt sich aus einem Link eine Übersetzung zwischen den Sprachen von Theorieelementen und damit ein Alignment zwischen Ontologien rekonstruieren, heißt der Link homomorph [Balzer u. a., 1987, S. 311].

Bemerkenswert ist, daß an Interpretationen der Kontextual Verteilten Semantik keine derartigen Forderungen gestellt werden. Neben der Eindeutigkeit der Modellpaar-Relation M_A zwischen lokalen Modellen der involvierten Ontologien ist das im Wesentlichen die Isomorphie. Ein Alignment A zur Übersetzung von Anfragen einer Anfrage-Ontologie O und einer Antwort-Ontologie O' mit einer Interpretation durch eine Modellpaare M_A und eine Domänenrelation r ist strukturerhaltend, wenn für Ontologeelemente e_1, e_2 aus O gilt,

$$\bigwedge_{\langle M, M' \rangle \in M_A} (e_1^M \subseteq e_2^M \rightarrow r(e_1^M) \subseteq r(e_2^M))$$

3.6 Fazit

Sowohl die grundlegenden Techniken zur Verknüpfung von Ontologien (Import, Namensräume), als auch komplexe Alignments lassen sich strukturalistisch rekonstruieren.

Mit einer strukturalistischen Reformulierung des Modellbegriffs formaler Ontologien lassen sich die Unterschiede der verschiedenen Semantiken für Ontology Alignments genau erfassen: Die *simple distributed semantics* ergibt sich als ein Spezialfall der strukturalistischen Semantik: Sie setzt voraus, daß beide Ontologien nur je einen Typus D und D' von Gegenständen besitzen und daß sich diese gegenseitig überschneiden ($D \cap D' \neq \emptyset$). Daraus ergibt sich die Voraussetzung $D = D'$. Die *contextual distributed semantic* erweitert den Modellbegriff eines Alignments gegenüber der simple distributed semantic um eine Domänenrelation, welche eine Zuordnung zwischen den Gegenständen beider Ontologien herstellt. In wissenschaftstheoretischer Terminologie handelt es sich dabei um eine *token by token* -Zuordnung. Auch die strukturalistische verteilte Semantik für Alignments zeichnet eine Zuordnung aus, diese stellt jedoch eine *type by type* -Zuordnung zwischen Typen von Gegenständen dar. Da die kontextual verteilte Semantik für Alignments auf empirisch interpretierten Domänen der beteiligten Ontologien beruht, ist die Angabe einer konkreten Domänenrelation r praktisch ausgeschlossen. Demgegenüber ist die Menge von Domäneninklusionen in ihrer Größe durch die Anzahl der Domänen und damit der beteiligten Konzepte nach oben beschränkt und somit konkret darstellbar. Eine Menge von Domäneninklusionen läßt sich stets in eine Domänenrelation übersetzen, mangels typisierten Domänen jedoch nicht umgekehrt.

Das Strukturalistische Framework erlaubt darüberhinaus eine feingranularere Semantik mit weniger Annahmen.

Die strukturalistische verteilte Semantik von Alignments weist – in Anlehnung an die ontologische Reduktion – gegenüber ihren Proponenten eine Richtung der Anwendung eines Alignments aus. Dies entspricht zum einen dem tatsächlichen Szenario des Zugangs zu fremdontologischen Wissensbasen, zum anderen handelt es sich mit der Auszeichnung einer Richtung um eine zusätzliche Information, die fruchtbar in die Interpretation eines Alignments einfließt. Resultat der hier beschriebenen Semantik ist nicht nur ein Kriterium, ob lokale Modelle auch Modelle eines Alignments sind, sondern auch welche zusätzlichen Voraussetzungen dafür angenommen werden müssen. Das kann in einer ontologischen Projektion oder in zusätzlichen geltenden Inklusionssverhältnissen in der Extension der beteiligten Ontologeelemente bestehen.

3 Verknüpfung von Wissen

Mit den wissenschaftstheoretischen Konzepten von Holon, Spezialisierung und Reduktion und deren Übertragung auf verteilte Wissensbasen gelingt eine direkte Anknüpfung der Wissensrepräsentation an Diskussionen der Wissenschaftstheorie.

4 Evolvierung von Wissen

„Das Assimilieren eines neuen Faktums verlangt mehr als eine additive Anpassung der Theorie, und solange diese Anpassung nicht abgeschlossen ist, die Wissenschaftler also nicht gelernt haben, die Natur anders zu sehen, ist die neue Tatsache gar kein richtiges wissenschaftliches Faktum.“

(Kuhn 1993, S. 66)

4.1 Einordnung und Thesen

Wissen ist beständig Veränderungen unterzogen. Bereits die erfolgreiche Anwendung vorhandenen Wissens beeinflusst dessen Grad an Validität. Darüber hinaus können verschiedene Umstände tiefgreifendere Veränderungen wie Erweiterung, Anpassung oder die Kontraktion von Wissen erfordern. Für den besonderen Fokus dieser Arbeit – den terminologischen Anteil von Wissen – stellt sich das Erfassen von Veränderung zusätzlich schwierig dar. Terminologische Anteile bilden zwar eine Voraussetzung für den Bestand propositionalen Wissens, der Wahrheitsgehalt bzw. die Aussagekraft terminologischen Wissens selbst, ist jedoch nur schwer erfaßbar. Während beispielsweise die Integrität einer Datenbank beim Löschen eines Datensatzes – also propositionales Löschen – kaum in Frage steht, verhält es sich beim Löschen eines Datenbankfeldes – also terminologisches Löschen – ungemein komplizierter. Nicht nur gehen damit verbundene Daten direkt verloren, im Falle von Schlüsselfeldern kann die gesamte Bedeutung der Datenbank betroffen sein. Was ist es also, das während eines Veränderungsprozesses gleich bleibt, und dazu Anlaß gibt, von einer Entwicklung, anstatt von andauernden Neubeginnen zu sprechen? Wie für Aspekte von Gehalt und Vernetzung von Wissen, gibt es auch hier auf dem Gebiet der Wissenschaftstheorie bereits eingehende Betrachtungen. Ziel dieses Kapitels ist es, einen Rahmen zur Rekonstruktion der Evolvierung von Wissen zu geben, der auf die informatische Wissensrepräsentation und insbesondere auf formale Ontologien anwendbar ist.

Im wissenschaftstheoretischen Strukturalismus existieren zwei Formen zur Rekonstruktion der Entwicklung von Wissen. 1) In der Rekonstruktion als Theorienetz werden verschiedene Varianten, die sich während der Entwicklung einer Theorie herausgebildet haben, untereinander ins Verhältnis gesetzt. Dem Konzept von Weiterentwicklung unter Konvergieren wird das Konzept der Ausdifferenzierung in verschiedene Annahmen gegenübergestellt. Mit jeder Spezialisierung in Form zusätzlicher Annahmen zeichnet sich ein Netz in einer Verästelung durch Annahmen ab. Theorienetze sind statisch und bieten dennoch die Möglichkeit, die verschiedenen Entwicklungsstände einer Theorie zu repräsentieren. 2) Mit der Repräsentation einer Reihe von Theorienetzen erlaubt die

Theorieevolution die Rekonstruktion der zeitlichen Dimension von Entwicklung. Die strukturalistische Theorie-Entwicklung ist angelehnt an das, was Kuhn als *normale Wissenschaft* [Kuhn, 1993] bezeichnet, was Lakatos als wissenschaftliche Forschungsprogramme beschreibt [Lakatos, 1987] oder sich in Flecks *Denkkollektiv* wiederfindet [Fleck, 1999]. Entwicklung nicht in einer Folge von Theorieelementen, sondern einer Reihung von Theorienetzen samt ihren sozialen Kontext zu repräsentieren, ermöglicht eine Darstellung von Wandel allein durch monotone Veränderungen. Das was Kuhn als ‚Pradigma‘, Lakatos als ‚Harten Kern‘ und Fleck als ‚Denkstil‘ bezeichnen, ist die metaphorische Struktur über welche innerhalb normalwissenschaftlicher Entwicklung Einigkeit in der Forschergemeinschaft herrscht. Die paradigma-geleitete Theorieevolution vereint die Momente von Dauer und Wandel und stellt ein Wissensmodell wissenschaftlicher Entwicklung dar.

Auf dem Gebiet formaler Ontologien werden die Weiterentwicklung und die damit verbundenen Aufgabenstellungen unter dem Begriff *ontology change* zusammengefaßt:

„The problem of deciding the modifications to perform upon an ontology in response to a certain need for change as well as the implementation of these modifications and the management of their effects in depending data, services, applications, agents or other elements.“ [Flouris u. a., 2008, S. 3]

Aus den verschiedenen Problemstellungen die mit *ontology change* in Verbindung stehen, sollen im Rahmen dieser Arbeit vier wesentliche Aufgaben adressiert werden. Das sind zum einen die automatisierte Erzeugung von Ontologien aus Dokumenten (*ontology learning*), die Einarbeitung von Änderungsanfragen in eine formale Ontologie (*ontology evolution*), der Umgang mit verschiedenen Versionen einer formalen Ontologie (*ontology versioning*), sowie das Zusammenführen bestehender Ontologien (*ontology merging*) [Flouris u. a., 2008, S. 6]. Die Revision einer formalen Ontologie ist prinzipiell problematisch, da selbst die Änderung eines Details, eine Menge an semantischen Verschiebungen der ABox nach sich ziehen kann. Welche dieser Nebenwirkungen wünschenswert und welche unerwünscht sind, läßt sich schwer beurteilen, da nicht jede Verwendung einer Ontologie antizipiert werden kann. Da sich jeder Änderungswunsch durch verschiedene Änderungen an einer Ontologie umsetzen läßt, muß zwischen den jeweiligen Konsequenzen abgewogen werden, ohne alle Auswirkungen zu kennen. Mit jeder Modifikation entsteht zudem eine neue Ontologie, wodurch der vereinheitlichende Zweck einer Ontologie geschmälert wird. Der Wunsch über Änderungen hinweg dennoch von *einer* Ontologie zu sprechen, ist somit von ganz praktischer Natur. Es müßte dazu jedoch a priori bestimmbar sein, welche Änderungen allgemeine Zustimmung finden. Es liegt auf der Hand, daß es für diese Problemstellungen keine ‚formale Lösungen‘ gibt, wenigstens so lange das Konzept der formalen Ontologie keine pragmatischen Aspekte beinhaltet. In Bezug auf die zentralen Thesen dieser Arbeit (Seite 22) soll insbesondere folgendes gezeigt werden:

These 1’’: Die Evolvierung konzeptionellen Wissens kann als *pragmatische Theorieevolvierung* rekonstruiert werden.

These 2’’: Die Klassifikation von Entwicklungsmustern für die Theorieevolution läßt sich auf die strukturalistische Interpretation Formaler Ontologien übertragen.

These 3''': Mit den Konzepten der *scientific community* und des Paradigmas läßt sich ein Grounding für den Entwicklungsverlauf Formaler Ontologien angeben.

These 4''': Die Interpretation formaler Ontologien als Theorienetz vereinfacht das Problem der Terminologischen Revision, insbesondere im Zusammenhang mit *ontology versioning*, *ontology merging*, *ontology evolution* und *ontology learning*.

These 5''': Die Rekonstruktion als pragmatische Theorieevolution deckt die Rationalität hinter der Ontologie-Entwicklung auf. Die Vielzahl von Änderungen im Zuge einer Ontologieentwicklung wird in generischen Strukturmustern intelligibel.

Abschnitt 4.2 gibt eine kurze Rekapitulation des strukturalistischen Verständnisses wissenschaftlicher Theorien in ihrer Entwicklung über die Zeit. In Abschnitt 4.3 werden die Kernfragen der Entwicklung formaler Ontologien präzisiert. Außerdem wird ein Überblick über den gegenwärtigen Stand an Ansätzen und Techniken gegeben. In Abschnitt 4.4 wird gezeigt, wie sich die Evolvierung formaler Ontologien strukturalistisch interpretiert läßt. Eine formale Ontologie läßt sich – je nach Disambiguierung – als Theorienetz oder als Theorieevolution rekonstruieren. In Abschnitt 4.5 werden die einschlägigen Methoden des *ontology changes* entlang der strukturalistischen Konzeption übersetzt und aus wissenschaftstheoretischer Perspektive bewertet.

4.2 Die diachronische Struktur wissenschaftlicher Theorien

Die Prägung der gegenwärtig einschlägigen Konzepte um Wissenschaft und Wissenschaftler vollzog sich im neunzehnten Jahrhundert. So stark war der gesellschaftliche Glaube an den Fortschritt, daß er eine eigene Institution samt ihrer Protagonisten hervorbrachte [Nisbet, 1980, S. 173f]. Um so verwunderlicher scheint es, daß in gängigen Konzeptionen wissenschaftlichen Wissens wie der von Wohlgenannt [1969], Aspekte von Wandel nicht zu finden sind. Erkennt man jedoch an, daß sich Theorien zu verschiedenen Zeitpunkten unterscheiden können, ergibt sich ein terminologisches Dilemma. Die verschiedenen Entwicklungsstände sind offenbar verschieden, gleichzeitig spricht man insgesamt von einer – der selben – Theorie. Diesem Problem begegnet bereits das erste der sieben Annahmen, mit denen Moulines die Ontologie wissenschaftlicher Theorien spezifiziert:

„(1) *There are scientific theories (in at least three different senses of the term ,theory‘).*“ [Moulines, 1996, S. 3]

Der Widerspruch von Wandel bei gleichzeitiger Identität wird umgangen, indem (zunächst) in zwei Bedeutungen von ‚Theorie‘ unterschieden wird – einer synchronischen, und einer *diachronischen*:

„(4) *Scientific theories are genidentical entities. They have a ,live‘ of their own, like persons or nations do.*“ [Moulines, 1996, S. 3]

Der synchronische Anteile einer Theorie, deren zeitlicher Verlauf genidentisch verstanden werden kann, besitzt eine Struktur aus einem harten – nach Lakatos – Kern und Hilfsannahmen:

„(2) Scientific theories are cultural objects of a rather abstract kind in the sense, that they are not spatiotemporally localized [...]“.

„(3) In a way similar to other abstract cultural objects, scientific theories have a ‚deep structure‘. [...]“ [Moulines, 1996, S. 3]

Mit den verschiedenen – teils inkomensurablen – Hilfsannahmen einer Theorie und der sich daraus ergebenden Gesamtstruktur zeigen sich zwei weitere Verwendungsweisen von ‚Theorie‘. Im gemeinen Theoriebegriff ohne eine Lakatos’ e Unterscheidung zwischen der gesamten Struktur und ihrer Bestandteile, lassen sich Widersprüche im Sprechen von einzelnen Varianten und ihrer Gesamtheit nur schwer aufklären. Das konzeptionelle Fundament der strukturalistischen Rekonstruktion von wissenschaftlichem Wissen im Wandel liegt in der Unterscheidung und Benennung der verschiedenen Verwendungsweisen von ‚Theorie‘ im Rahmen von Entwicklung:

1. Das *Theorieelement* (siehe Kapitel 2) stellt die kleinste Einheit wissenschaftlichen Wissens dar, der empirische Behauptung zugesprochen werden kann. Das Theorieelement selbst, bildet keine Aspekte von Wandel ab, bildet aber den Bestandteil von Theorienetzen.
2. Im *Theorienetz* wird eine Theorie in ihrer Feinstruktur aus Fundamentalthorieelement und darauf aufbauenden Hilfsannahmen dargestellt. Zwar stellt auch das Theorienetz keinen Wandel im eigentlichen Sinne dar, jedoch läßt sich Wandel, aus der Perspektive einer Verschiebung von Hilfsannahmen, auch synchronisch als Theorienetz darstellen.
3. Beim *pragmatisch erweiterten Theorieelement* handelt es sich im Wesentlichen um das synchronische Theorieelement (aus 1) erweitert um Konzepte dessen Ursprungs sowie dessen Herkunft.
4. Parallel dazu, findet beim *Pragmatisch erweiterten Theorienetz* eine Erweiterung des synchronischen Theorienetzes (aus 2) um die Aspekte des pragmatisch erweiterten Theorieelementes (aus 3) statt. Das Verhältnis zwischen Hilfsannahmen und Kern einer Theorie (zwischen Theorieelement und Fundamentelement) gibt dann neben einer inhaltlichen Eingrenzung auch eine tatsächliche Entwicklungslinie wieder.
5. Während pragmatisch erweiterte Theorienetze die Schnappschüsse in einem Entwicklungsverlauf repräsentieren, wird in der *Theorieevolution* die Weiterentwicklung empirischen Wissens als eine besondere Reihung pragmatisch erweiterter Theorienetze dargestellt.

4.2.1 Theorienetze und Spezialisierung

Jede Spezialisierung hat ihren Preis. Zwar wird durch jede Anpassung die Ausnutzung einer besonderen Umgebung erreicht, andererseits kostet jede Spezialisierung eine Passungsbreite bzw. Allgemeinheit. Da die Anpassung an eine bestimmte Umgebung auf verschiedene Weisen Ausdruck finden kann, kann eine Anpassung durch mehrere Varianten möglich sein. Da diese verschiedenen Varianten nicht notwendig Spezialisierungen voneinander sind, stellen sich Spezialisierungen im Allgemeinen nicht linear als Kette, sondern als verzweigte Struktur dar. Auch Theorien (Theorieelemente) können durch Hinzunahme von Annahmen eine Anpassung an besondere Bedürfnisse erfahren. Neben der Einbettung (Reduktion) zählt die Restriktion (Spezialisierung) zu den beiden fundamentalen Brückenstrukturen [Ludwig, 1984, S. 17]. Da auch die verschiedenen Varianten einer Theoriespezialisierung nicht Spezialisierung voneinander sein müssen, ergibt die Rekonstruktion der Theoriespezialisierung ein Netz – das *Theorienetz*.

Spezialisierung Wie für alle Brückenstrukturen in der strukturalistischen Rekonstruktion, ist auch die Spezialisierungsrelation über den Modellen von Theorieelementen definiert. Die Besonderheit der Spezialisierung gegenüber Constraints und Links liegt darin, daß sie nicht nur die potentiellen Modelle eines oder mehrerer Theorieelemente, sondern auch die übrigen Konstituenten eines Theorieelements in Beziehung setzt. Diese fließen in die Anforderungen ein, wann zwei Theorieelemente in Spezialisierungsrelation stehen. Die Grundidee, ein Theorieelement T' als Spezialisierung $T'\sigma T$ eines Theorieelementes T zu bezeichnen ist, daß sich T' nur durch zusätzliche Gesetze bzw. Annahmen von T unterscheidet. Modelltheoretisch gesprochen geschieht dies durch eine Ausdünnung von Mengen $M(T)$, $C(T)$, $L(T)$ oder $I(T)$ der Theorie T zu denen von T' . Das Vokabular beider Theorien, d.h. der Strukturtyp der Modelle von T und T' bleibt hingegen gleich, weswegen insbesondere ($M_p(T) = M_p(T')$) gilt. Ebenso bleibt die Unterscheidung der T -theoretischen und -nichttheoretische Größen gleich ($M_{pp} = M'_{pp}$).

Definition 4.1. (Nach [Balzer u. a., 1987]) Sind $T = \langle M_p, M, M_{pp}, C, L, I \rangle$ und $T' = \langle M'_p, M', M'_{pp}, C', L', I' \rangle$ idealisierte Theorieelemente, dann ist T' eine *idealisierte Spezialisierung* von T (abgekürzt als $T'\sigma T$) gdw.:

1. $M'_p = M_p$ und $M'_{pp} = M_{pp}$
2. $M' \subseteq M$, $C' \subseteq C$, $L' \subseteq L$ and $I' \subseteq I$

In Bedingung 1 wird gefordert, daß sich im Zuge der Spezialisierung von T zu T' weder das Vokabular der Theorie, noch dessen Einordnung in theoretische/nicht-theoretische Größen ändert. Gemäß Bedingung 2 erlaubt eine Spezialisierung die Ausdünnung der Menge aktueller Modelle M zu M' , eine Ausdünnung der Constraintmenge C zu C' für Gesetze höhere Ordnung oder eine Ausdünnung des lokalen Anteils der Link-Modell-Menge L zu L' durch Brückengesetzen. Weiterhin darf gemäß (2) im Schritt von T zu T' die Menge der intendierten Anwendungen I zu I' ausgedünnt werden.

Theorienetze Eine Menge von Theorieelementen bildet ein *Theoriennetz*, wenn die involvierten Theorieelemente durch die Spezialisierungsrelation (halb-)geordnet sind.

Definition 4.2. (Nach [Balzer u. a., 1987, S. 172]) Ist \bar{T} eine nichtleere, endliche Menge von Theorieelementen und ist σ eine Spezialisierungsrelation über \bar{T} , so heißt $N = \langle N, \sigma \rangle$ ein *Theoriennetz*.

Theorienetze besitzen auf Grund der Forderung $M_p = M'_p$ ein über allen Theorieelementen konstantes Vokabular. Auch wenn diese Forderung für bestimmte physikalische Theorien sinnvoll ist, erweist sie sich für andere Anwendungen als mitunter zu streng [Diederich, 1989]. Expliziert man ‚Theorie‘ als eine Menge von Größen über den Gegenständen einer (oder mehrerer) Domäne(n), lassen sich verschiedene mögliche Gesetzmäßigkeiten zwischen jenen Größen in einem Theorienetz als eine „Theorie“ a) zusammenfassen und b) ordnen. Der Aspekt der Ordnung kann gering sein, da ein Theorienetz weder zusammenhängend sein braucht, noch – falls doch zusammenhängend – eine gemeinsame Basis besitzen muß. Von größerem Interesse für die Rekonstruktion wissenschaftlichen Wissens sind *Theorie-Bäume*.

Definition 4.3. (Nach [Balzer u. a., 1987, S. 175]) Ist N ein zusammenhängendes Theorienetz, dann heißt N Theoriedbaum, gdw. die Menge der Theorieelemente in N , von denen alle anderen Theorieelemente eine Spezialisierung sind, eine Einermenge ist.

Beispiel 4.1. *Die Rekonstruktion der Klassischen Partikelmechanik* (nach [Balzer u. a., 1987]). Die klassische Partikelmechanik ist innerhalb der strukturalistischen Literatur das klassische Beispiel für eine Theorie, die sich nur inadäquat im *statement view* darstellen läßt. Im Gegensatz zur Rekonstruktion als einzelnes Theorieelement erlaubt die Rekonstruktion als Theorienetz eine Analyse der Verhältnisse der verschiedenen Prinzipien die unter dem Namen Klassische Partikelmechanik vereint sind. Das Fundamentelement *CPM* beinhaltet im Wesentlichen Newtons zweites Gesetz, „Kraft gleich Masse mal Beschleunigung“. Spezialisierungen werden im Graphen durch nach unten laufende Kanten symbolisiert. Ausgehend vom Fundamentelement gibt es im Netz vier Hauptlinien in denen weitere Annahmen bezüglich der Kräfte getroffen werden. Die *Newtonsche* klassische Partikelmechanik (*NCPM*) stellt eine Symmetriebedingung auf und beinhaltet Newtons drittes Gesetz ‚actio=reactio‘. Die Linie der Spezialisierung durch positionsabhängige Kräfte (*PCPM*) führt Kräfte ein, die von der Position eines Teilchens abhängig sind (wie sie z.B. in nichthomogenen Feldern entstehen können). In geschwindigkeitsabhängigen (*velocity-dependent*) Partikelmechaniken (*VPCM*) sind solche Kräfte erlaubt, die von der Geschwindigkeit eines Partikel abhängen. Darunter zählen beispielsweise Reibungskräfte. In zeitabhängigen Partikelmechaniken (*TCPM*) sind Kräfte erlaubt, welche vom Alter eines Partikels abhängen. Eine Rekonstruktion als Theorienetz findet sich in Abbildung 4.1. Die Annahmen all jener Kräfte sind so gewählt, daß sie untereinander kompatibel sind, weswegen die beschriebenen Linien wieder zusammenlaufen können.

Theorienetze erlauben die Modellierung von Aspekten wissenschaftlicher Forschungsprogramme. Die Äste eines Spezialisierungsbaums lassen sich als „Schutzgürtel“ zum „verdauen“ [Lakatos, 1974, S. 131] von noch unerklärten Anomalien deuten. Die Annahmen durch weiter vom Fundamentelement entfernten Knoten, werden dann eher

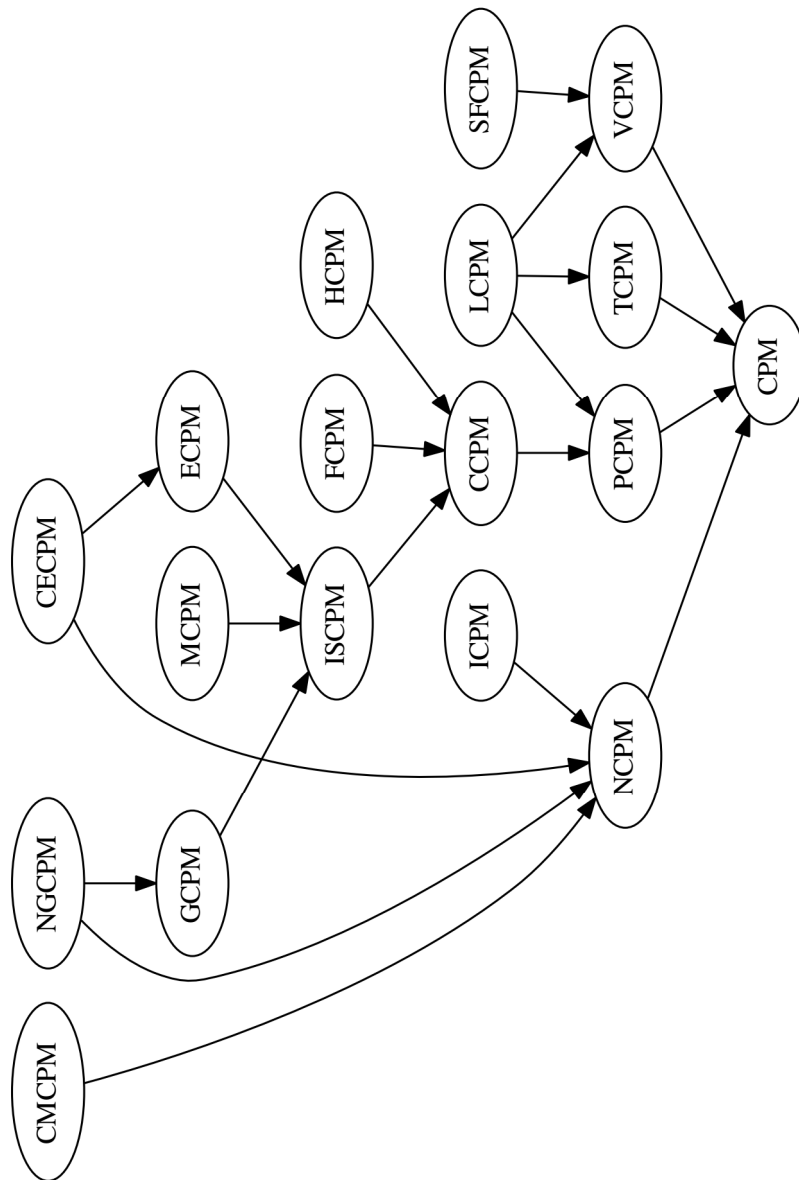


Abbildung 4.1: Theorienetz der Partikelmechanik (aus [Balzer u. a., 1987]).

preisgegeben, als diejenigen von geringer Distanz. Das Fundamentelement ist in der Regel immun gegen empirische Falsifikation, da dessen Hypothesen nicht empirischer, sondern epistemischer Art sind. Im Gegensatz zur Feinstruktur von Forschungsprogrammen spiegelt ein Theorienetz die jeweils zu einem Zeitpunkt günstigste Anordnung von Annahmen wieder und kann sich im Prinzip von Schnappschuß zu Schnappschuß vollständig umordnen. Die wissenschaftlichen Forschungsprogramme Lakatos' entwickeln sich evolutionär durch Anpassung an neue Bedürfnisse oder Beobachtungen weiter. Die größere Entsprechung finden sie daher in pragmatisch erweiterten Theorienetzen.

4.2.2 **Strukturalistische Grundkonzepte Wissenschaftlicher Entwicklung**

Soll die Entwicklung wissenschaftlichen Wissens erklärbar gemacht werden, bedarf es eines Modells, das zum einen den Umfang an Quellenmaterial reduziert und zum anderen Kompetenz vermittelt [Knüpfer u. a., 2013]. Ein erprobtes und verbreitetes Narrativ von Entwicklungsprozessen wird mit der Evolutionären Epistemik beschrieben. Deren ursprüngliche und prägendste Verwendung findet sich auf dem Gebiet der Biologie in der Evolutionstheorie zur Entstehung der Arten [Darwin, 1985]. Das Schema der Evolution durch natürliche Selektion, läßt sich in drei essentiellen, formalen Prinzipien zusammenfassen [Lewontin, 1970, S. 1]: (1) Phänotypische Variation: Verschiedene Individuen haben verschiedene Eigenschaften. (2) Differenzierte Angepaßtheit: Verschiedene Individuen einer Population haben verschiedene Überlebens- und Reproduktionsraten in verschiedenen Umgebungen. (3) Vererbung der Angepaßtheit: Es gibt eine Korrelation im Auftreten von Eltern und Nachfahren im Verhältnis nachfolgender Generationen. Neben der klassischen Anwendung zur Erklärung des Ursprungs der Arten, findet das Schema evolutionärer Entwicklung auch Anwendung auf den Gebieten der Soziologie [Spencer, 1873, S. 34], Geschichtswissenschaft [Diamond und Ordunio, 2005], Chemie [Miller u. a., 1953], Psychologie [Plotkin, 1982] und schließlich der Wissenschaftstheorie [Popper, 1972].

Soll die Entwicklung wissenschaftlichen Wissens evolutionär erklärt werden, bedarf es zuerst einer geeigneten Reduktion der wissenschaftlichen Konzepte auf die des evolutionären Schemas. Die diachronische Entwicklung einer Theorie über ihre synchronischen Stadien stellt sich in ihrer Grundidee wie folgt dar: Synchronisch verstandene Theorien – so wie sie jeweils von einer Menge von Forschern innerhalb einer historischen Periode vertreten werden – spielen die Rolle der Individuen. Die Gesamtheit der Forscher welche eine bestimmte Theorie während einer historischen Periode vertreten – die Forschergeneration – ist expliziter Bestandteil einer Theorie. Damit ist sichergestellt, daß Theorien in dieser synchronischen Bedeutung – genauso wie Individuen – nicht mehrfach auftreten können. (Phänotypische) Eigenschaften einer Theorie sind deren empirischer Gehalt. Die Angepaßtheit einer Theorie besitzt eine semantische und eine pragmatische Dimension. Anpassung heißt, a) der Kern einer Theorie umfaßt die intendierten Anwendungen der Theorie (Erfüllen der empirischen Behauptung). Sowie b), innerhalb einer wissenschaftlichen Gemeinschaft finden sich Anhänger der Theorie. Die möglichen Umgebungen einer Theorie sind Klassen von (paradigmatischen) intendierten Anwendungen (z.B. die Klassische Partikelmechanik in der Umgebung des Pendels, von Planetensystemen

oder von Molekularteilchen). Von einer Theorie in einer historischen Periode können andere Theorien in der darauffolgenden Periode abstammen. Die Angepaßtheit einer Theorie in einer Umgebung korreliert mit der Angepaßtheit der von ihr abstammenden Theorien. Theorie-Netze spielen die Rolle einer Population. Eine Theorieevolution wird schließlich als eine sich über die Zeit erstreckende Sequenz von Theorienetzen verstanden. Das Netz kann über verschiedene Entwicklungsstufen wachsen, schrumpfen oder sich in bestimmten Teilbereichen stärker ausdifferenzieren, während es in anderen Bereichen an Differenzierung verliert. Dafür erfährt auch die Konzeption der Grundbausteine – der Theorieelemente – eine Erweiterung um Facetten des historischen Kontextes. Die Grundbegriffe der strukturalistischen, diachronischen Theoriekonzeption werden im Folgenden formal eingeführt.

Historische Perioden und Vorgängerschaft Das strukturalistische Verständnis der Entwicklung einer Theorie erfolgt als eine Reihung wohlunterschiedener Abschnitte. *Historische Perioden* bezeichnen Entwicklungsabschnitte, innerhalb deren keine Entwicklung dargestellt werden braucht. Historische Perioden sind Intervalle auf einer Zeitachse, wenngleich sie innerhalb einer Rekonstruktion lediglich als identifizierbare Gegenstände Verwendung finden. Per Namenskonvention werden historische Perioden innerhalb einer Rekonstruktion in ihrer zeitlichen Abfolge nummeriert und mit h_1, \dots, h_n bezeichnet, wobei h_i für die i -te Periode steht. Jede diachronische untersuchte Theorie umfaßt ein Tupel historischer Perioden $\langle h_1, \dots, h_n \rangle$, wobei h_1 für den Zeitpunkt der Geburt, h_n für den Zeitpunkt des Endes der Betrachtung einer Theorie steht. Neben der Ordnung historischer Perioden h_i durch ihre Benennung, wird deren zeitliche Reihenfolge in Form einer Ordnungsrelation – der historischen Vorgängerschaft – repräsentiert. Die *historische Vorgängerschaft* \leq ist eine zweistellige Relation über historischen Perioden, wobei $h_i \leq h_j$ gilt, gdw. die historische Periode h_i vor h_j lag oder gleich mit h_i ist. Die Relation \leq ist damit reflexiv, transitiv und antisymmetrisch (eine Halbordnung). Eine Menge H von historischen Perioden einer Rekonstruktion samt historischer Vorgängerschaft \leq – heißt *Geschichte*, wenn die historischen Perioden in H bezüglich \leq total geordnet sind. Die Menge der Geschichten H aller betrachteten Theorien ($H \subseteq HIST$) heißt *HIST*.

Wissenschaftler, Gemeinschaften und Generationen In in der synchronischen Sprechweise der Anwendung eines Theorieelements $T = \langle K, I \rangle$, intendiert ein Anwender intendierte Modelle I durch den Kern K zu erklären bzw. darauf anzuwenden. In der diachronischen Sprechweise werden die Anwender von T explizit gemacht. Eine Menge von ‚Wissenschaftlern einer Generation‘, intendieren K auf I anwenden. *Wissenschaftler* bilden eine Grundmenge, als die gewillten Anwender einer Theorie (eines Theorieelementes). Die Menge *SOPH* umfaßt die Anwender jedweder Theorie. *Wissenschaftlergemeinschaften* setzen sich aus einer Menge von Wissenschaftlern in einem (gemeinsamen) Forschungsprogramm zusammen. Jede wissenschaftliche Gemeinschaft SC ist eine Teilmenge aller Wissenschaftler, $SC \subseteq SOPH$. Wissenschaftlergemeinschaften überdauern in der Regel jeden ihrer Anhänger. Während sich eine Wissenschaftlergemeinschaft SC über mehrere historische Perioden hinweg erstrecken kann, sind *wissenschaftliche Generationen* G , $G \subseteq SC$ jeweils genau einer historischen Periode h_i zugeordnet. Wissenschaftler einer

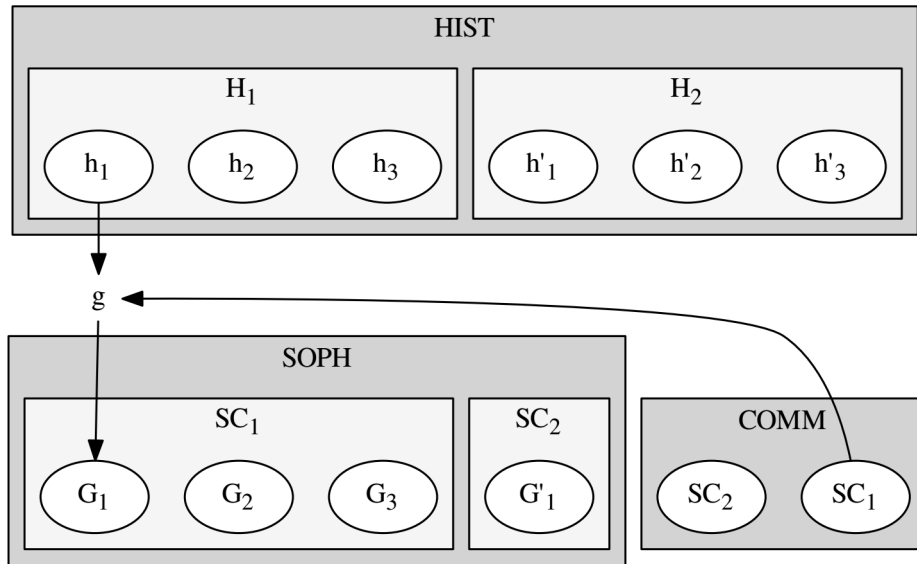


Abbildung 4.2: Struktur der diachronischen Primitive.

Generation G kommunizieren untereinander in einer eignen, spezifischen und nur von ihnen beherrschten Sprache. Wissenschaftler einer Generation G teilen Techniken des Experimentierens, der Beobachtung und Messung, der Klassifikation und des Aufstellens und des Bestätigens von Hypothesen. Eine Wissenschaftlertgemeinschaft SC umfaßt innerhalb einer historischen Periode h_i genau eine wissenschaftliche Generation G . In der Menge $COMM$ werden aller rekonstruierten Wissenschaftlertgemeinden SC zusammengefaßt ($COMM \subseteq \mathbf{P}(SOPH)$). Die eindeutige Zuordnung zwischen wissenschaftlicher Generationen G und historischer Periode h_i im Kontext einer Wissenschaftlertgemeinschaft SC wird durch die *Generationenfunktion* g repräsentiert. Die Generationenfunktion g beschreibt, welche Teilmenge G aus $SOPH$ einer Wissenschaftsgemeinschaft SC aus $COMM$ zu einer bestimmten historischen Periode h_i aus $HIST$ aktiv war.

$$\begin{aligned}
 g : HIST \times COMM &\rightarrow \mathbf{P}(SOPH) \\
 g(h_i, SC_j) &= G_k
 \end{aligned}$$

Auf Grund der Forderung nach eincindeutiger Zuordenbarkeit von historischen Perioden h_i und Generationen G_k innerhalb einer Community SC_j , ist g bezüglich des wissenschaftlichen Gemeinschaften bijektiv in $COMM$ und G_k s. Eine Veranschaulichung der Struktur zwischen den eingeführten Mengen findet sich in Abb. 4.2.2. Im Kontext einer Wissenschaftlertgemeinschaft SC läßt sich die parametrisierte Generationenfunktion $g_{SC}(h) = g(h, SC)$ definieren. Die einstellige Funktion g_{SC} ordnet bijektiv zwischen historischen Perioden und Wissenschaftlertgenerationen. Die Abkürzung h_G , $h_G = g_{SC}^{-1}(G)$ steht für die historische Periode einer Wissenschaftlertgeneration G , SC_G stehe für die wissenschaftliche Gemeinschaft der Generation G_i und G_i stehe für die Wissenschaftlertgeneration einer Wissenschaftlertgemeinschaft während der historischen Periode h_i .

4.2.3 Theorie-Evolvierung

Strukturalisten gehen davon aus, daß die genannten primitiven pragmatischen Konzepte ausreichen, um in Verbindung mit ihren synchronischen Theoriekonzepten die Evolvierung empirischen Wissens beschreiben zu können. Das synchronische Theorieelement (Abschnitt 2.2.2) wird dazu um eine pragmatische Dimension zum *diachronischen Theorieelement* erweitert. Ebenfalls wird die synchronische Spezialisierungsrelation (Abschnitt 4.2.1) zur *diachronischen Spezialisierung* erweitert und abgewandelt. Damit entsteht ein erweiterter Begriff eines *diachronischen Theorienetzes*. Über diesen wird schließlich die Theorie-Evolvierung und deren Spezialform, die Paradigma-geleitete Theorieevolution definiert.

Diachronisch erweitertes Theorieelement

Definition 4.4. (Nach [Balzer u. a., 1987, S. 216]) Ist g eine Generation-Funktion, dann heißt T ein *diachronisches* (idealisiertes) Theorieelement (für g) gdw. K, I, SC, h, G existieren mit

1. $T = \langle K, I, G \rangle$.
2. $\langle K, I \rangle$ ist ein Theorieelement.
3. SC ist eine Wissenschaftlergemeinschaft (*scientific community*).
4. h ist eine historische Periode.
5. $g(h, SC) = G$.
6. G beabsichtigt K auf I anzuwenden.

Eine geschichtliche Rekonstruktion besitzen einen hohen Grad an Arbitrarität. Insbesondere die generationen-Funktion g hängt vom Zweck der Rekonstruktion und dem angestrebten Grad an Details ab. Diachronische Theorieelemente sind im Kontext einer Generationenfunktion g definiert und gegenüber synchronischen Theorieelementen um eine wissenschaftliche Generation G erweitert. Deren Mitglieder (Elemente von G) beabsichtigen, die intendierten Anwendungen des Theorieelementes I auf den Kern K des Theorieelementes anzuwenden. Die Menge der Anhänger einer Theorie während einer historischen Periode sind im diachronischen Theorieverständnis konstituierendes Merkmal eines Theorieelementes. Das diachronische Theorieelement „lebt und stirbt“ mit seinen Vertretern und ist damit singular.

Pragmatisch modifizierte Spezialisierungsrelation Die Definition der synchronischen Spezialisierung (Def. 4.1) läßt sich in zwei Bestimmungen zerlegen. Zum einen werden die Kerne zweier Theorieelemente in Relation gesetzt, zum anderen deren Mengen intendierter Anwendungen. Die diachronische Spezialisierung baut auf der Kern-Spezialisierung $*\sigma$ über synchronischen Theorieelementen auf.:

Definition 4.5. (Nach [Balzer u. a., 1987, S. 216]) Seien K und K' Kerne zweier Theorieelemente $T = \langle K, I \rangle$ und $T' = \langle K', I' \rangle$. K' ist *Kern-Spezialisierung* von K , kurz $K' * \sigma K$, gdw.

1. $M'_p = M_p$ und $M'_{pp} = M_{pp}$
2. $M' \subseteq M, C' \subseteq C, L' \subseteq L$.

Definition 4.6. (Nach [Balzer u. a., 1987, S. 216]) Ist g eine Generation-Funktion, dann heißt σ_d *diachronische Spezialisierungsrelation* über einer (nichtleeren) Menge X von diachronischen Theorieelementen gdw. für alle $T, T' \in X$ mit $T' \sigma_d T$ und $T = \langle K, I, G \rangle$ und $T' = \langle K', I', G' \rangle$ gilt:

1. $K'^* \sigma K$
2. $I' \cap I \neq \emptyset$
3. $h(G) \leq h(G')$
4. $SC_G = SC_{G'}$

Während sich synchronische und diachronische Spezialisierung in Bezug auf Kerne von Theorieelementen nicht unterscheiden (1), erfordert die diachronische Spezialisierung, daß beide Theorieelemente gemeinsame Anwendungen besitzen müssen (2). Im Rahmen der Spezialisierung dürfen intendierte Anwendungen ‚vergessen‘ werden, während neue hinzukommen. Die diachronische Spezialisierung ist im Gegensatz zur synchronischen nicht transitiv. Unspezifischere Theorieelemente liegen historisch *vor* dem spezialisierten (3) und die Theorieelemente werden innerhalb derselben Wissenschaftlergemeinschaft verwendet (4).

Diachronische Theorienetze

Definition 4.7. (Nach [Balzer u. a., 1987, S. 217]) Sei $|N|$ eine Menge von diachronischen Theorieelementen und σ_d eine diachronische Spezialisierungsrelation über $|N|$. Dann heißt $N = \langle |N|, \sigma_d \rangle$ ein *diachronisches Theorienetz* gdw. für alle $T, T' \in |N|$: $G(T) = G(T')$.

Ist N ein diachronisches Theorienetz, so heißt h_N *die mit N assoziierte historische Periode*, und SC_N *die mit N assoziierte wissenschaftliche Gemeinschaft*.

Alle Theorieelemente eines Netzes gehören der selben wissenschaftlichen Generation an, weshalb auf Grund der Bijektivität der Generationenfunktion g folgt, daß alle Theorieelemente eines Netzes in derselben historischen Periode liegen und von derselben Wissenschaftsgemeinde geteilt werden.

Während die Vorgängerrelation \leq über einzelnen Theorieelementen definiert ist, wird eine ähnliche Relation für ganze Theorienetze definiert:

Definition 4.8. Seien N und N' Theorienetze. Dann heißt N' *direkter Nachfolger* von N gdw.

1. $N \neq N'$,
2. $SC_N = SC'_{N'}$,
3. $h_N \leq h'_{N'}$ sowie

4. Es gibt kein Theorieennetz N_i so daß

- a) $N_i \neq N$ und $N_i \neq N'$,
- b) $SC_{N_i} = SC_N$
- c) $h_N \leq h_{N_i} \leq h_{N'}$.

Es wird gefordert, daß (1) ein Netz N sich nicht selbst folgen kann, daß (2) das direkt nachfolgende Netz noch von der selben Wissenschaftsgemeinschaft angewendet wird, nicht notwendiger Weise von derselben Generation ist und daß innerhalb der Rekonstruktion (4) kein Netz zwischen den direkt nachfolgenden stehen darf. Diese direkte Nachfolgeschaft zwischen zwei Netzen N zu N' verschärft die Forderung (3) daß die historischen Perioden h_N und $h_{N'}$ in welchen beide Netze liegen einer Linie angehören.

Mit der direkten Nachfolgeschaft zwischen Netzen und der diachronischen Spezialisierungsrelation zwischen diachronischen Theorieelementen läßt sich der Begriff der Theorie-Evolution definieren.

Definition 4.9. Eine endliche Sequenz $\langle N \rangle_i$ von Theorienetzen N_i heißt (idealisierte) *Theorieevolution* E gdw. für alle in der Sequenz benachbarten Paare von Netzen N_i, N_{i+1} gilt:

- 1. N_{i+1} folgt direkt auf N_i
- 2. Für jedes Theorieelement T_{i+1} des Netzes N_{i+1} , gibt es ein Theorieelement T_i aus dem Netz N_i , so daß $T_{i+1} \sigma_d T_i$.

Da in einem evolvierten Theorienetz jedes beteiligte Theorieelement eine (diachronische) Spezialisierung eines Theorieelementes des Vorgängernetzes ist, ist für das gesamte Netz sichergestellt, daß es sich um eine Weiterentwicklung derselben Theorie und keine bloße Aneinanderreihung von Neuentwürfen handelt. Auf Grund der diachronischen Spezialisierung von Theorieelementen können in der Evolvierung von Theorienetzen intendierte Anwendung des anfänglichen Theorieelementes in mehreren Schritten ganz ausgewechselt werden.

Kuhn charakterisiert die Phase normalwissenschaftlicher Entwicklung entlang eines *Paradigmas* [Kuhn, 1976]. Paradigmen sind bei Kuhn elementare Anschauungen, meist in Form von Beispielen, die als Prototyp jedes zu erklärenden Anwendungsfalls dienen. Wissenschaftliche Revolutionen sind demgegenüber durch die Abkehr von einem zunehmend abgelehnten Paradigma und dem Hinwenden zu einem neuen Paradigma gekennzeichnet. Definition 4.9 der Theorieevolution läßt jedoch zu, daß im Laufe der Entwicklung alle intendierten Anwendungen und damit die eine Theorie wesentlich prägenden Anwendungsfälle ausgetauscht werden.

Kuhnsches Paradigma Auf die Frage, was an einer Theorie im Angesicht zeitlichen Wandels Identität stiftet, ist bis zu diesem Punkt hauptsächlich pragmatisch argumentiert worden: Die Genidentität einer Theorie konstruiert sich entlang einer Kette von Vertretern die alle derselben Wissenschaftergemeinschaft angehören. Über die Beschaffenheit eines intrinsisch gegebenen Kerns, der Phasen des Wandels notwendig übersteht, ist damit

noch keine Aussage getroffen. Ausgangspunkt der strukturalistischen Darstellung eines identitätsstiftenden Kerns einer Theorie ist die Angabe ihres Anwendungsbereiches. Für welche Domänen eine empirische Theorie T bestimmt ist, gehört mit $T = \langle K, I \rangle$ zu ihren unverzichtbaren Merkmalen. Die Menge I der für die Anwendung einer Theorie intendierter Anwendung muß prinzipiell offen sein: Intendierte Anwendungen müssen sich als nicht haltbar überführen und zurücknehmen lassen, falls die Prognose des Anwendungsbereichs zu optimistisch war. Neue intendierte Anwendungen müssen aufgenommen werden können, wenn die Prognose der Anwendbarkeit einer Theorie sogar übertroffen wird. Um invariante, identitätsstiftende Anwendungen einer Theorie auszeichnen zu können, wird eine weitere Menge I_0 *paradigmatischer Anwendungen* unterschieden, wobei $I_0 \subseteq I$. Im Falle der klassischen Partikelmechanik ist die Menge paradigmatischer Anwendungen definiert durch $I_0 = \{\text{Billardkugeln, Pendel, Gaspartikel, } \dots\}$. Eine Menge paradigmatischer Anwendungen samt eines Kerns K_0 an ontologischen, wesensgebenden Kennzeichnungen bildet ein Theorieelement $\langle K_0, I_0 \rangle$, das innerhalb des Strukturalismus zur Darstellung eines Kuhnsches Paradigma dient.

Definition 4.10. Sei E eine Theorieevolution. Dann heißt $\langle K_0, I_0 \rangle$ *Kuhnsches Paradigma* für E gdw. für jedes Netz N in E und für jedes Theorieelement $T_i = \langle K_i; I_i; G_i \rangle$ aus $|N|$ gilt:

1. K_i ist eine (Kern-) Spezialisierung von K_0 , das heißt $K_i^* \sigma K_0$.
2. I_0 ist eine von G_i anerkannte Untermenge paradigmatischer Anwendungen für die von G_i intendierten Anwendungen I_i .

Indem sich ein Paradigma $\langle K_0, I_0 \rangle$ in diesem Sinne durch alle Theorieelemente aller Theorienetze jeder historischen Periode zieht, ist es invariant für eine Phase normalwissenschaftlicher Entwicklung. Mit der Definition des Kuhnschen Paradigmas läßt sich eine verschärfte Fassung der Theorieevolution definieren:

Definition 4.11. Eine Theorieevolution E heißt *Kuhnsche (paradigma-geleitete) Theorieevolution* gdw. K_0 und I_0 existieren, so daß $\langle K_0, I_0 \rangle$ ein Kuhnsches Paradigma für E ist.

Beispiel 4.2. Eine Theorie sei als paradigma-geleitete Evolution rekonstruiert. Die Rekonstruktion umfasse eine Wissenschaftlergemeinschaft SC und zwei historische Perioden h_1 und h_2 . Während der historischen Periode h_1 ist eine Wissenschaftlergeneration G_1 ($G_1 \subseteq SC$) aktiv, während der Periode h_2 die Generation G_2 ($G_2 \subseteq SC$). Das Netz zur Rekonstruktion der historischen Periode h_1 umfasse drei Theorieelemente T_{1a}, T_{1b} und T_{1c} mit einem Fundamentelement T_{1a} , das historisch nachfolgende Netz während h_2 besitze ebenfalls drei Theorieelemente T_{2a}, T_{2b} und T_{2c} mit einem Fundamentelement T_{2a} . Jedes Theorieelement der zweiten historischen Periode läßt sich als diachronische Spezialisierung eines Theorieelementes der ersten historischen Periode darstellen. Ein synchronisches Theorieelement – das Kuhnsche Paradigma TP – ist Fundamentelement aller Netze. Die Spezialisierungsverhältnisse zwischen den Theorieelementen sind in Abb. 4.2.3 graphisch dargestellt.

Für ein konkretes Beispiel zur Rekonstruktion der Entwicklung der Newtonschen Partikelmechanik siehe [Moulines, 1979].

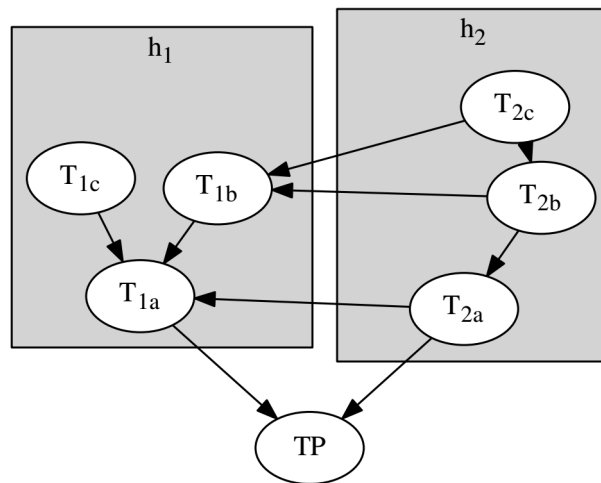


Abbildung 4.3: Veranschaulichung einer Kuhn'schen Theorieevolution mit Paradigma *TP* durch diachronische Spezialisierung von Theorieelementen.

4.3 Evolvierung in der Entwicklung Formaler Ontologien

„Regardless of the complexity of the ontology engineering setting, what is currently lacking is an unified overview of the wide variety of models and mechanisms that can be used to support all [...] aspects of ontology evolution.“

(Leenheer und Mens 2008)

Sich wandelndes Wissen bedeutet in der klassischen dualistischen Konzeption der Wissensrepräsentation eine Revision des Terminologischen Wissens (TBox), oder des assertionalen Wissens (ABox) einer Wissensbasis. Terminologischer Wandel an formalen Ontologien zeigt sich als besonders schwer zu handhaben:

- Terminologisches Wissen sollte prinzipiell statisch sein [Nebel, 1990, S. 197]. Andererseits ist terminologisches Wissen nicht prinzipiell immun gegen Revision [Quine, 1980, S. 43], und nicht zuletzt notwendig [Nebel, 1990, S. 4] Änderungen unterworfen.
- Über die Bedeutung terminologischer Revision bestehen kein umfassender Konsens oder allgemein akzeptierte Prinzipien [Foo, 1995, S. 27]. So lassen sich zum Beispiel für die Operation „Entfernen eines Terms aus einer Terminologie“ mindestens drei verschiedene Bedeutungen angeben, wobei keine dieser Explikationen vollends überzeugt [Abrett und Burstein, 1986].
- Terminologisches Wissen ist in erster Linie nicht empirisch falsifizierbar. Dennoch haben Änderungen an einer Terminologie Einfluß auf propositionales, empirisches Wissen. Das Beispiel „unser Sonnensystem umfaßt 9 Planeten“ vor und nach dem 24. August 2006 [IAU, 2006], zeigt, wie weit die Konsequenzen von Änderungen an ontologischen Wissen reichen können.

Einen Oberbegriff zu den verschiedenen Problemstellungen die mit der Entwicklung formaler Ontologien verbunden sind, bildet die *ontology evolution*.

Definition 4.12. *Ontologie-Evolvierung (ontology evolution)* ist die zeitliche Anpassung einer Ontologie an veränderte Bedingungen und die konsistente Propagierung der Änderungen an die abhängigen Artefakte. [Sure und Tempich, 2004]

Im vernetzten Szenario des Semantic Webs in dem gemeinsam verwendete Ontologien als formal fixierte Sprachkonventionen eine Schlüsselrolle spielen, erweist sich deren Modifikation als besonders problematisch. Hier ist nur schwer sicherzustellen, daß sich Veränderungen an einer Ontologie innerhalb der intendierten Bedeutung aller Partizipanten der Ontologie bewegen. Leenheer und Mens [2008] sprechen daher von einer *co-Evolution* in welcher sich Ontologien und ihre *Communities* gemeinsam entwickeln. In dieser pragmatischen Dimension unterscheidet sich die Problemstellung der Ontologie-Evolvierung sehr von der älteren *Schema-Evolvierung* des Datenbankmanagements wo Schema und Datensätze einer gemeinsamen Kontrolle unterliegen [Noy und Klein, 2004]. Die verschiedenen Ansätze zur Ontologie-Evolution sind auf Grund ihrer konzeptionellen Eigenständigkeit nur schwer untereinander vergleichbar [Stojanovic u. a., 2002, S. 289]. Die bestehenden Heuristiken der Ontologienentwicklung bauen stark auf der Expertise der Entwickler auf und sind theoretisch nicht immer fundiert, wodurch deren formale Eigenschaften teils unspezifiziert bleiben [Flouris u. a., 2006, S. 16]. Methoden oder Werkzeuge welche die Aufgabe der Ontologieevolution vollständig automatisierbar machen, existieren zur Zeit nicht [Stojanovic u. a., 2002, S. 286].

Noy und Klein [2004] leiten eine Systematisierung von Gründen für eine Ontologie-Evolvierung aus Grubers Definition einer Ontologie als *explizite Spezifikation der Konzeptionalisierung einer Domäne* [Gruber, 1993b] ab:

1. Die Domäne einer Ontologie kann sich ändern – verursacht durch eine Änderung in der ‚wirklichen Welt‘. Werden beispielsweise zwei Forschungseinrichtungen mit verschiedenen administrativen Strukturen zusammengeführt, so muß die sich neu ergebende Struktur auch in der Ontologie abgebildet werden.
2. Die Konzeptionalisierung kann sich auf Grund eines veränderten Blicks oder einer anderen Perspektive auf die Welt weiterentwickeln. So kann eine Taxonomie der Flora eines bestimmten Biotops die bisher phänotypisch, nach sichtbaren Unterscheidungskriterien ausgerichtet war, in einer Unterscheidung nach der genidentischen Entwicklungs-Herkunft eine in Punkten abweichende Taxonomie ergeben.
3. Die explizite Spezifikation kann sich verändern, wenn beispielsweise eine Ontologie von einem Repräsentationsformalismus in einen anderen übersetzt wird. Die Semantik einer Ontologie über verschieden ausdrucksstarken Sprachen hinweg beizubehalten, ist keine triviale Aufgabe (siehe [Gruber, 1993a]).

Die gebräuchlichsten Konzepte zur Ontologie-Evolvierung sind angelehnt an die Systematisierung der Technologie von Datenbankmanagementsystemen. Der Vorschlag zu einer auf Datenbank-Terminologie basierenden Begrifflichkeit findet sich in [Dyreson u. a., 1994], Aspekte der Evolvierung von Datenbankschemata werden in [Roddick, 1995] näher ausgeführt. In [Stojanovic, 2004] wird der Versuch einer Übertragung auf Aufgabenstellungen der Ontologie-Evolvierung vollführt:

Ontology management faßt die Menge aller Methoden und Techniken zusammen, die nötig sind, um Ontologien in verschiedenen Versionen und Varianten nutzbar zu machen. Ein Ontology-management-System sollte daher Ontologien erzeugen, modifizieren, versionieren, abfragen und speichern können. Ähnlich einem Datenbank-Management-System (DBMS) sollte es dem Anwender eine Abstraktion von Datenstrukturen zur Organisation und Prozessen der Suche und des Abfragens bieten.

Ontology modification heißt die Veränderung einer Ontologie ohne die Berücksichtigung von äußeren Abhängigkeiten und innerer Konsistenz.

Ontology evolution heißt die Veränderung einer Ontologie unter Berücksichtigung von äußeren Abhängigkeiten und innerer Konsistenz, d.h. ohne den Verlust von Information.

Ontology versioning heißen Verfahren die – i.d.R. innerhalb von Wissensrepräsentationssystemen – den Zugriff auf verschiedene Stadien einer Ontologie in Vergangenheit und Zukunft erlauben und Informationen über deren Veränderung zur Verfügung stellen.

Die gegenüber dem Management von Datenbanksystemen erweiterten Anforderungen der Entwicklung von Ontologien, bringen weitere Aufgaben mit sich.

Ontology merging heißt der Prozess in dem mehrere Ontologien als Vorlage zur Erzeugung einer neuen, umfassenden Ontologie dienen, welche möglichst viele konzeptionelle Unterscheidungen der Ausgangsontologien weiterhin trifft und dabei möglichst minimal ist. [Hitzler u. a., 2005]

Ontology learning heißt das Identifizieren von Termen, Konzepten, Relationen und Axiomen aus Texten zur Erzeugung oder Pflege einer Ontologie.[Wong u. a., 2012, S. 20:3]

Im Rahmen dieses Kapitels sollen exemplarisch vier weitgehend unabhängige Aufgabenstellungen oder Ansätze der *ontology evolution* untersucht werden. Diese werden im folgenden zunächst vorgestellt. In den darauffolgenden Abschnitten 4.4 und 4.5 erfolgt eine Rekonstruktion und Bewertung aus wissenschaftstheoretischer und strukturalistischer Perspektive.

4.3.1 Ontology Learning

Seit der Entwicklung der ersten Expertensysteme gilt die Akquise von Wissen als einer deren wesentlichen Erfolgsfaktoren. Die Übertragung von Expertenwissen in eine effektive Wissensbasis ist sowohl schwierig, als auch zeitaufwändig. Die Auffassung der Wissensakquise als der größte Flaschenhals in der Entwicklung von Expertensystemen wird bei aller Heterogenität an Methoden geteilt [Cullen und Bryman, 1988, S. 216]. Mit dem Wunsch nach einer automatischen Generierung einer Wissensbasis aus Fachquellen entstanden dafür bereits früh verschiedene Ansätze und Werkzeuge [Cullen und Bryman, 1988, S. 217]. *Ontology learning* ist eine moderne Form des Wissensakquiseproblems für formale

Ontologien. Im Gegensatz zum historischen, allgemeinen Wissensakquiseproblem ist beim *ontology learning* nicht eine Wissensbasis, sondern nur eine Ontologie die gewünschte Ausgabe. Um eine – in den Größenordnungen des heutigen Semantic Webs notwendige [Zhou, 2007]– maschinelle Generierung zu erlauben, kommt nicht – wie traditionell üblich – einem Experteninterview in Frage, sondern die (halb) automatische Verarbeitung von Fachtexten. Belebung hat die gegenwärtige Disziplin des *ontology learnings* insbesondere durch statistisch fundierte Techniken (Information Retrieval, Maschinelles Lernen, Data Minings), linguistisch fundierte Methoden, sowie Logik-basierte Methoden (Wissensrepräsentation) [Wong u. a., 2012, S. 20:7] erfahren.

Eine formale Ontologie aus Texten zu gewinnen, heißt insbesondere, relevante Klassen und Rollen (‚nicht-taxonomische Relationen‘ [Wong u. a., 2012]), und gegebenenfalls Individuen zu extrahieren und diese in Form von Axiomen in Relation zu setzen. Handelt es sich bei den gewonnenen Axiomen ausschließlich um taxonomische Verhältnisse (‚taxonomische Relationen‘) spricht man von einer leichtgewichtigen Ontologie, im Gegensatz zur einer schwergewichtigen (*heavy weight*) Ontologie mit unbeschränkten Axiomen [Giunchiglia und Zaihrayeu, 2009]. Die Arbeitsweise der verschiedenen existierenden Techniken läßt sich in eine Folge von Arbeitsschritten unterteilen (nach [Wong u. a., 2012, S. 20:6f]):

1. *Vorverarbeitung und Extraktion von linguistischen Termen (keyphrase- bzw. linguistic term -extraction)*: Die Eingabetexte werden vorverarbeitet, indem die tatsächliche Eignung überprüft und relevante Abschnitte bestimmt werden. Im Zuge der Extraktion von Wendungen wird der Text in dessen Wort-Token überführt und auf Stabilität von Wortgruppen untersucht. Die gewonnen stabilen Wortgruppen (*multi word*) sowie einzelne Wörter (*single word*) – zusammen *keyphrases* – gehen in den darauffolgenden Arbeitsschritt ein.
2. *Konzeptbildung und -benennung*: Die Konzepte der zu erzeugenden Ontologie werden durch die Gruppierung ähnlicher Wendungen gewonnen. Zum einen müssen dafür verschiedene Terme als Varianten eines Konzeptes erkannt werden: ‚Tintenstrahldrucker‘, ‚Laserdrucker‘, ‚Nadeldrucker‘ können in diesem Sinn Varianten eines Konzeptes sein. Dieses Konzept bedarf einer passenden Benennung, z.B., ‚Drucker‘. Substantive gelten als gute Kandidaten zur Gewinnung von Konzepten.
3. *Extraktion taxonomischer Verhältnisse*: Das Aufstellen von Subklassenverhältnissen zwischen den benannten gefundenen Konzepten ergibt eine Konzepthierarchie. Zum Herstellen taxonomischer Verhältnisse kann sowohl die Textbasis als auch Hintergrundwissen in Form vordefinierter Verhältnisse oder Wörterbücher einbezogen werden.
4. *Aufdecken und Benennung von Rollen (discover non-taxonomic relations)*: Relationen werden vor allem durch die Analyse der syntaktischen Struktur innerhalb der Ausgangstexte gewonnen. Verben gelten dabei als guter Indikator für Rollen.
5. *Entdecken von Axiomen*: Verhältnisse zwischen Konzepten und Rollen, die über die Subsumtion zwischen atomaren Rollen und Axiomen hinausgehen, erlauben in der

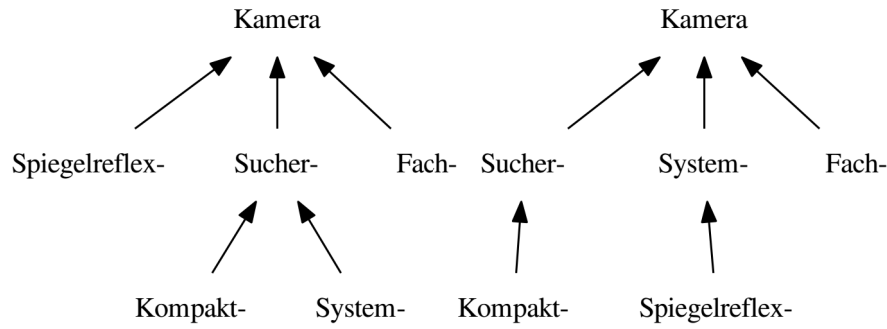


Abbildung 4.4: Ein Referenzontologie (links) und eine gelernte Ontologie (rechts) optischer Systeme von Fotokameras.

Anwendung einer Ontologie ein höheres Potential in der Ableitung von Begriffsverhältnissen. Gewonnen werden diese komplexen Axiome durch Generalisierung und Induktion über einer großen Anzahl von Relationen.

In Anbetracht des hohen Maßes an Unterbestimmtheit beim Erzeugens von Ontologien und der hohen Kunstfertigkeit die der Prozess mitsichbringt, ist es um so wichtiger, die erzeugten Ontologien und damit die eingesetzten Verfahren zu evaluieren. Die Evaluation von Ontologien, bzw. die Evaluation von Verfahren zu deren Erzeugung, ist ein wichtiger Bestandteil von *ontology learning* Systemen [Wong u. a., 2012, S. 20:11]. Die verschiedenen Ansätze zur Evaluation maschinell erlernter Ontologien lassen sich in drei Gruppen unterscheiden: Der Evaluation innerhalb ihrer Anwendung, der Evaluation durch Experten, sowie der Evaluation gegenüber eines unabhängig definierten *Goldstandards* [Dellschaft und Staab, 2006]. Auf Grund der leichteren Modellierbarkeit des Goldstandard-Ansatzes, soll dieser im Folgenden betrachtet werden.

Prinzipiell läßt sich die Ausgabe jedes der fünf anfangs genannten Schritte mit einer Referenzontologie vergleichen, wobei jeder dieser Vergleiche ganz eigene Vergleichsmaße erfordert. Stellvertretend soll ein Vergleich der taxonomischen Verhältnisse zweier Ontologien – konkret einer generierten, und einer Referenzontologie – skizziert werden. Ausgangspunkt bilden eine Referenzontologie \mathcal{O}_R und eine gelernte Ontologie \mathcal{O}_L mit je einer Menge von Konzepten \mathcal{C}_R und \mathcal{C}_L samt Konzepthierarchien \sqsubseteq_R und \sqsubseteq_L . Ein Beispiel zweier zu vergleichender Teilontologien findet sich in graphischer Darstellung in Abbildung 4.4.

Die Bewertung der taxonomischen Verhältnisse einer gelernten Ontologie ist um so sinnvoller, je mehr Übereinstimmung zwischen Konzeptmengen von gelernter und Referenzontologie herrscht. Diese läßt sich gegebenenfalls zuvor mit den Maßen *Precision* und *Recall* im Sinne des Information Retrievals bewerten [Sabou u. a., 2005]. Beim Taxonomievergleich selbst wird gemessen, wie ähnlich sich die Positionen jeweils derselben lexikalischen Terme innerhalb zweier Ontologien sind. Eine gebräuchliche Methode, die Position einer Klasse innerhalb einer Ontologie so zu charakterisieren, daß sie mit Vorkommen in anderen Taxonomien vergleichbar wird, ist die *semantische Kotopie* (*semantic cotopy*). Die semantische Kotopie einer Klasse c innerhalb einer Taxonomie O ist die Menge aller Sub- und Superkonzepte von c in O [Maedche und Staab, 2002]. Die semantischen Kotopien des Terms ‚Sucherkamera‘ im Beispiel der Abbildung 4.4

umfassen ‚Kamera‘, ‚Kompaktkamera‘ und ‚Systemkamera‘ in der Referenzontologie sowie ‚Kamera‘ und ‚Kompaktkamera‘ in der gelernten Ontologie. Die Überschneidungen der semantischen Kotopien eines Konzeptes in verschiedenen Ontologien lassen sich mit Hilfe des precision-Maßes bewerten. Die (lokale) Summe aller Präzisionsbewertungen über die vorkommenden Konzepte ergibt schließlich ein (globales) Maß für die Übereinstimmung zweier Ontologien [Dellschaft und Staab, 2006].

Es gibt inzwischen eine Reihe von Systemen zum *ontology learning* [Faure und Nedellec, 1999; Cimiano u. a., 2005; Hahn und Romacker, 2001]. Gleichwohl wird die Arbeit an den gegenwärtigen Systemen noch im Bereich der Forschung verortet [Ding und Foo, 2002]. So haben viele der gegenwärtigen Systeme bereits Probleme mit der Extraktion von Wendungen [Fürst und Trichet, 2006]. Wie bei vielen anderen Techniken des Semantic Webs werden vor allem leichtgewichtige Ontologien verarbeitet bzw. erzeugt. Das Feld des Lernens ausdrucksstarker formaler Ontologien hat um so stärkeren Forschungscharakter.

4.3.2 Ontology Evolution

Ontologien bilden das Rückgrat vieler akademischer und industrieller Anwendungen. Sie sind damit auch der Dynamik und Veränderungen ihrer Einsatzumgebung unterworfen. Sich wandelnde Anforderungen der Einsatzgebiete können dann auch Anlaß zur Anpassung von Ontologien geben [Stojanovic u. a., 2002]. Der Prozess der Anpassung einer Ontologie an wechselnde Anforderungen heißt *ontology evolution*. Die Evolvierung von Ontologien ist ein prinzipiell schwieriges Unterfangen. Neue Anforderungen können mit einer bestehenden Ontologie formal unvereinbar sein, wenn durch sie Klassen prinzipiell leere Extensionen erhalten („rundes Quadrat“). Die Ausgangsontologie muß dann einer Revision unterzogen werden, in deren Zuge Annahmen fallen gelassen werden müssen. Die Wegnahme von Annahmen hat wiederum Auswirkungen zur Konsequenz, deren Vertretbarkeit mit den Anforderungen einer Ontologie übereingebracht werden müssen. Es liegt nahe, für diesen Teilaspekt der Ontologieevolvierung auf Resultate der Theorieevolvierung zurückzugreifen. In der A.G.M.-Theorie wird bereits untersucht, wie Bruchstücke neuer Information, die inkonsistent mit einem gegenwärtigen Wissensstand sind, so hinzugefügt werden können, daß der resultierende neue Wissensstand konsistent ist [Gärdenfors, 1992, S. 3]. Eine direkte Anwendung dieser Theorie ist jedoch nicht möglich, da mit der Theorie nicht die explizite Konstruktion von revidierten Theorien beschreiben werden, sondern lediglich Postulate aufgestellt werden, welche für den Prozess des Evolvierens plausibel erscheinen [Makinson, 1985, S. 350]. Da das Revisionsproblem unterdeterminiert ist [Makinson, 1985, S. 350], sind für die letztliche Ausführung von Änderung nicht nur logische Expertise, sondern Kenntnisse über den Einsatz einer Ontologie notwendig. Versuche, die A.G.M.-Theorie für die Entwicklung von Ontologien einzusetzen, mußten außerdem erkennen, daß die Umsetzung des einleuchtenden Kriteriums *minimaler Änderung* eine Ausdrucksstärke des einzusetzenden Formalismus erforderte, der für Ontologien nicht zweckmäßig ist [Flouris u. a., 2006].

Doch auch der weniger augenscheinliche Fall von neuen Anforderungen, die nicht widersprüchlich zu einer bestehenden Ontologie sind, ist problematisch. So steht beispielsweise die 2006 von der Internationalen Astronomischen Union zur Planetendefinition hinzugenommene Bedingung (Planeten sind das dominierende Objekt ihrer Umlaufbahn)

nicht in Widerspruch zu den bisherigen Kennzeichen (Umlaufbahn um die Sonne, hydrostatisches Gleichgewicht herstellende Masse) [IAU, 2006]. Allerdings sind gegebenenfalls Klassifikationen innerhalb einer abhängigen Datenbasis betroffen (Pluto ist ein Planet). Auch die hypothetische Zurücknahme dieser Bedingung hätte Konsequenzen. ‚Planet‘ ist dann nicht mehr Subkonzept von ‚Umlaufbahn dominierendes Objekt‘ (ähnliche Problemsituationen beschreibt [Nebel, 1990, S. 6]). Zwar kann beim Evolvieren einer Ontologie innerhalb einer Wissensbasis der Effekt auf die von der Ontologie abhängige ABox überblickt und berücksichtigt werden [Nebel, 1990, 240], jedoch ist der Rückgriff auf Anwendungsdaten im verteilten Szenario des Semantic Webs nur partiell möglich.

Wenn auch die Aussicht auf eine automatisierte Evolvierung von Ontologien gering scheint, bleibt die Möglichkeit, den manuellen Prozess der *ontology evolution* zu normieren. Dahinter steht die Hoffnung, daß durch Einhalten einer Struktur im Entwicklungsprozess, immer noch eine Güte des Resultats sichergestellt ist. Design-Prozesse können helfen, notwendige Informationen im Vorfeld auszumachen, die anfallenden Arbeitsschritte zu ordnen, die Zusammenarbeit zu organisieren oder die Qualität einer Entwicklung zu bewerten [Parnas und Clements, 1986]. Ausgangspunkt der wichtigsten Entwicklungsprozesse zur *ontology evolution* bilden die Entwicklungsmodelle der Softwareentwicklung. Für die beide klassischen Modelle – Wasserfallmodell [Royce, 1970] und Spiralmodell [Boehm, 1988] – existieren Adaptionen zur *ontology evolution* [Stojanovic u. a., 2002; De Nicola u. a., 2009]. Exemplarisch soll in diesem Abschnitt der Prozess nach [Stojanovic u. a., 2002] betrachtet werden. Der gesamte Prozess von einer neuen Anforderung an eine Ontologie bis zur modifizierten Ontologie samt Änderungsprotokoll wird in vier Phasen unterschieden:

1. In der Phase der *change representation* wird zunächst formal ausgedrückt, welche Veränderung an der Ontologie vorgenommen werden soll. Das kann beispielsweise die Einführung einer Oberbegriffs für zwei bestehende Begriffe sein. Es hat sich gezeigt, daß atomare Aufgaben wie *add-concept* oder *delete-subconcept-of* zu wenig über die Intention der Änderung aussagen und sich umgekehrt die intendierten Änderungen auf verschiedene Weisen, atomar realisieren lassen. Daher wird eine Menge von zusammengesetzten *tasks* ausgezeichnet, welche zur Repräsentation der Veränderung verwendet werden (beispielsweise *merge-concepts*, *extract-subconcepts* oder *shallow-concept-copy*).
2. In der Aktivität *semantics of change* werden durch die Modifikationen entstehende Inkonsistenzen und semantische Verschiebungen innerhalb der Ontologie zusammengefaßt. Dazu werden neben der betreffenden Ontologie nach Möglichkeit auch abhängige Ontologien oder Schnittstellen zu Informationssystemen betrachtet.
3. In der Aktivität *change implementation* werden alle Implikationen welche sich durch die Modifikation für die Ontologie ergeben, zu einer Bestätigung durch einen Experten zusammengefaßt und die vorgeschlagenen Änderungen gegebenenfalls freigegeben.
4. Im vierten Schritt der *change propagation* werden die Implikationen der Modifikation auf andere Ontologien zusammengefaßt und gegebenenfalls verbreitet. Insbesondere

kann es an anderer Stelle möglich werden, Instanzen neu zu klassifizieren oder bezüglich der modifizierten Ontologie als *out dated* zu markieren. Für abhängige Ontologien kann es nötig sein, den Evolvierungsprozess rekursiv fortzuführen.

Die Tragweite eines Änderungswunsches an einer Ontologie hängt in hohem Maße vom Typ der Änderung ab. Das Anlegen einer Klasse innerhalb einer Ontologie birgt keinen Informationsverlust. Dagegen entsteht beim Löschen einer Klasse, unabhängig von den Strategien zur Behandlung der zugehörigen Unterklassen und Individuen, ein Verlust an Differenzierung und damit an Information [Noy und Klein, 2004, S. 436]. Da Meta-Operationen (z.B. ‚Verschieben einer Klasse in der Hierarchie nach unten‘) verlustfrei bezüglich der konzeptionellen Unterscheidungskraft sein können, während die zugehörigen atomaren Operationen einen Informationsverlust mit sich bringen, lohnt sich die Repräsentation zusammengesetzter Operationen. Eine mögliche Auswahl von Operationen zur Modifikation von Ontologien samt ihrer Auswirkung auf den Informationsgehalt von Wissensbasen findet sich in [Noy und Klein, 2004, S. 436]. Die inhaltliche Schwierigkeit der *ontology evolution* besteht in der Behandlung der verschiedenen Modifikationsoperationen. Der zu organisierende Umgang mit veränderten Ontologien, insbesondere die Repräsentation von Modifikationen sowie das Auflösen von Abhängigkeiten zwischen Anwendungen und Ontologien wird unter dem Namen *ontology versioning* zusammengefaßt.

4.3.3 Ontology Versioning

Im Szenario verteilter Informationen wie dem des Semantic Webs, können auch fremde Informationsressourcen von einer Ontologie abhängen. Eine Änderung einer Ontologie betrifft damit auch all jene Informationssysteme, in denen Bezug auf die geänderte Ontologie genommen wird. Es kann andererseits nicht erwartet werden, daß jede Änderung an einer Ontologie von all ihren Anwendern zur Notiz genommen, akzeptiert und – unter womöglich größerem Aufwand – adaptiert wird. Es läßt sich so nur schwer vermeiden, daß Abhängigkeiten auf verschiedene Versionen einer Ontologie parallel bestehen. Mit der Modifikation einer bestehenden Ontologie sollte daher stets eine neue Datei erstellt werden, in der die neue Version repräsentiert wird [Heflin und Pan, 2004, S. 63]. Andererseits entsteht dadurch eine Situation der Koexistenz verschiedener Versionen einer Ontologie. Das Managen verschiedener Varianten einer Ontologie im Gefüge mit abhängigen Anwendungen, anderen Ontologien und Daten ist Ziel des *ontology versionings* [Klein und Fensel, 2001]. Zwei Fragestellungen spielen eine zentrale Rolle: Die Frage nach Identität einer Ontologie und die Frage nach Kompatibilität zwischen verschiedenen Versionen.

Identität über Ontologie-Versionen hinweg. Es ist wünschenswert, über verschiedene Ontologien die in ihrer Entwicklung auseinander hervorgegangen sind, als *eine* Ontologie sprechen zu können. Insbesondere die praktisch relevante Funktion von Ontologien als kontrolliertes Vokabular [Smith und Kumar, 2004] wird ohne die bindende Klammer einer Identitätsvorstellung nicht herstellbar, wenn die Sprecherkreise verschieden versionierter Vokabularen nicht als ein Sprecherkreis gelten. Für die Formulierung einer Identitätsbedingung bedarf es eines Kriteriums mit dem entschieden werden kann, bis zu welchem Grad der Abweichung zwei Versionen einer Ontologie als eine Ontologie

betrachtet werden. Weiterhin bedarf es einer begrifflichen Differenzierung zwischen der abstrakten Ontologie als Ganzes und den verschiedenen Versionen Ihrer Entwicklung.

In OWL als dem quasi offiziellen Ontologie-Formalismus des Semantic Webs sind bereits verschiedene Schlüsselwörter zur Auszeichnung von Versionsinformationen integriert [Patel-Schneider u. a., 2004]. Ein `owl:versionInfo`-Schlüsselwort erlaubt eine freitextuelle Angabe zur Version eines OWL-Konstrukts (der gesamten Ontologie, einer Konzeptdefinition, einer Rollendefinition, etc.). Ein `owl:priorVersion`-Schlüsselwort erlaubt eine Referenz auf eine andere Ontologie, welche als vorhergehende Version identifiziert wird. Jede OWL-Datei gilt damit als Ontologie, andererseits kann sie als Version einer Ontologie ausgezeichnet sein. Ein Kriterium welche Eigenschaften zwischen verschiedenen ausgezeichneten Versionen mindestens unverändert bleiben müssen, ist mit diesen Sprachmitteln nicht verbunden. Die vorhandenen Schlüsselwörter besitzen keine formale Semantik [Heflin und Pan, 2004].

Kompatibilität zwischen Ontologie-Versionen In der Kompatibilität zwischen verschiedenen Versionen von Schemata und Anwendungsversionen werden zwei Richtungen unterschieden [Roddick, 1995]: In der *restrospektiven* Verwendung wird eine Anwendung auf die zurückliegende Version eines Schemas bezogen, in der *prospektiven* Verwendung wird eine Anwendung auf eine zukünftige Version des Schemas bezogen. Retrospektiv/Prospektiv heißt im Kontext des *ontology versionings* die Bezugnahme auf eine ältere/neuere Ontologie-Version, als ursprünglich spezifiziert. Die Anwendung einer Ontologie bedeutet das Eingebundenwerden durch eine weitere Ontologie oder die Auszeichnung von Daten in den Termen einer Ontologie.

Eine Revision an einer Ontologie heißt *abwärtskompatibel*, wenn die Interpretation von Daten (bzw. einer anderen Ontologie) im Kontext der revidierten Ontologie sich gegenüber der Interpretation in einer früheren Ontologieversion nicht ungewollt unterscheidet. Die Verwendung der neueren Ontologie erfolgt dabei prospektiv. Eine Revision an einer Ontologie heißt *aufwärtskompatibel*, wenn an Stelle der zur Interpretation von Daten spezifizierten Ontologie, die revidierte, neuere Ontologie verwendet werden kann, ohne daß die Semantik der Daten eine ungewollte Veränderung erfährt. Die Verwendung der Ontologie erfolgt dabei retrospektiv. Revision die sowohl aufwärts- als auch abwärtskompatibel sind, heißen *vollständig kompatibel*, Revisionen die weder aufwärts- noch abwärtskompatibel sind, heißen *inkompatibel* [Klein und Fensel, 2001].

In OWL stehen Ausdrücke zur Verfügung, um Modifikationen an der gesamten Ontologie bezüglich ihrer Kompatibilität zu markieren. Ein `owl:backwardCompatibleWith`-Ausdruck erlaubt die prospektive Verwendung der Ontologie an Stelle der angegebenen, mit dem `owl:priorVersion`-Ausdruck läßt sich eine zeitliche Ordnung über Ontologien angeben. Die Deklaration Ein `owl:incompatibleWith`-Ausdruck verweist auf eine andere Ontologie und gibt zum einen an, daß es sich bei dieser um einen Vorgänger handelt, zum anderen, daß die aktuelle Ontologie zu dieser inkompatibel ist. Die Ausdrücke `owl:DeprecatedClass` und `owl:DeprecatedProperty` entsprechen den Ausdrücken `owl:Class` und `owl:Property` zum Einführen neuer Klassen und Rollen, jedoch mit dem Hinweis, daß von der weiteren Benutzung jener Klassen und Rollen abgesehen werden soll, da diese in zukünftigen Versionen der Ontologie nicht mehr vorhanden

sind. Alle Kompatibilitätsmarkierenden Ausdrücke (bzw. die Nutzung der deprecated-Variante an Stelle der Standard-Varianten zur Klassen- und Rollendeklaration) haben gemeinsam, nicht zur Bedeutung einer Ontologie im logischen Sinn beizutragen, d.h. modelltheoretisch neutral zu sein [Bechhofer u. a., 2004, §7.4]. Auch die Auszeichnung von Kompatibilitätsangaben obliegt ganz dem Herausgeber jeder Ontologieversion. Die Kompatibilitätsangaben sollen dem Anwender einer Theorie lediglich andeuten, daß zwei Ontologieversionen dieselben intendierten Modelle besitzen sollten, und eine neue Revision einer Ontologie sicher an Stelle der ursprünglichen Bindung verwendet werden kann [Bechhofer u. a., 2004, §7.4]. Während entscheidbar ist, wann die Modellmengen zweier Ontologien (respektive der Projektion auf Modelle einer kleineren Sprache) gleich sind, ist dies für die jeweiligen Mengen *intendierter* Modelle nicht direkt möglich. Klassen werden in Ontologien in der Regel nur partiell definiert. Wird eine neue Klasse A unter Verwendung eines Ontologieelements B mit der Unterklassenbeziehung $A \sqsubseteq B$ eingeführt, ist A – sofern nicht durch hinreichend viele Axiome weiter spezifiziert – nicht *eliminierbar* [Beth, 1953]. Der atomare Term A läßt sich nicht über die gesamte Ontologie durch einen anderen Term ersetzen, so daß die Ontologie ohne A semantisch äquivalent zur Ontologie mit A wäre. Eine Revision von $A \sqsubseteq B$ zu $A' \sqsubseteq B \sqcap C$ macht A und A' damit zwar nicht für alle Modelle äquivalent ($A \not\equiv A'$), aber möglicher Weise für alle *intendierten* Interpretationen \mathcal{I} , womit im Kontext jener \mathcal{I} , $A^{\mathcal{I}} = A'^{\mathcal{I}}$ gilt. Ob eine Revision also konzeptionell, d.h. bezüglich des Konzeptes A hinter der Klasse A kompatibel ist, ist nicht ohne vollständige Kenntnis eines hypothetischen, vollständig definierenden Axioms $A \equiv A$ möglich.

Weiterführende Ansätze Die Ansätze welche das Identitäts- und das Kompatibilitätsproblem adressieren, lassen sich in zwei Gruppen unterteilen: (a) Zum einen diejenigen, die ein Annotationsschema für Ontologien und Daten zur adäquaten manuellen Annotation vorschlagen. (b) Zum anderen solche, die eine Semantik über einer Entwicklungslinie vorschlagen.

(a) Im Umgang mit Versionen hat sich in der Softwareentwicklung ein Schema mit zweistufiger Versionsnummer mit *major*- und *minor*-Nummer etabliert. *Minor-releases* sind kompatibel zu ihren Vorgängern, *major-releases* zeigen eine zeitliche Abfolge von verschiedenen Kompatibilitätsphasen an [Brown und Runge, 2000]. Eine zweistufige Konzeption von unveränderlichen, über die Zeit stabilen *spezifischen Ressourcen (URIs)* und *generisch auflösbaren Ressourcen* zu deren Umschreibung, wurde schon früh für das Semantic Web als notwendig betrachtet [Berners-Lee, 1996]. Ein möglicher Vorschlag zur Konzeption von Identität sieht sieben Grundsätze vor [Klein und Fensel, 2001, S. 12]:

„

1. Es sind drei Klassen von Ressourcen zu unterscheiden: Dateien, Ontologien sowie Linien von abwärtskompatiblen Ontologien.
2. Die Änderung einer Datei zieht einen neuen Dateiidentifikator nach sich.
3. Die Identifikation einer Datei erfolgt durch eine URL-Adresse.
4. Nur eine veränderte Konzeptionalisierung führt zu einem neuen Ontologie-Bezeichner.

5. Ontologien werden mit einem zweistufigen URI-Numerierungsschema identifiziert. Die Nebenversionsnummer (*minor number*) gibt den Index abwärtskompatibler Änderungen an. Versionen mit höherer Nebenversionsnummer wird zugesichert, äquivalent an Stelle von Versionen mit kleinerer Nebenversionsnummer verwendet werden zu können. Die Nebenversionsnummer identifiziert eine spezifische Ontologie. Die Hauptversionsnummer (*major number*) gibt einen Index inkompatibler Versionen an. Eine Ontologie-URI mit Hauptversionsnummer und ohne Nebenversionsnummer identifiziert eine Linie abwärtskompatibler Ontologieversionen.
6. Klassen- und Relationsdefinitionen in Ontologien mit gleicher Hauptversionsnummer werden als äquivalent angenommen.
7. Auf Ontologien wird durch eine Ontologie-URI mit einer gewünschten Hauptversionsnummer und der kleinstmöglichen Nebenversionsnummer, also mit minimal notwendigen zusätzlichen Annahmen verwiesen.

”

Auf Grund des rein deklarativen und semantisch neutralen Charakters läßt sich diese Konzeption leicht in bestehende Ontologieformalismen integrieren [Klein u. a., 2002]. Liegen Ontologien nicht bezüglich Kompatibilität annotiert vor, erlauben Werkzeuge zur *change detection* wie PROMTDIV[NOY u. A., 2004] einen Vergleich samt einer heuristisch unterstützten Bewertung beider Ontologien.

(b) In semantischen Ansätzen des *ontology versionings* wird der Modellbegriff von Daten und Ressourcen so erweitert, daß Auszeichnungen von Kompatibilität darin einfließen. Ziel ist es, den Konsequenzbegriff nicht nur auf klassische Wissensbasen, sondern auf ganze Bereiche des semantischen Webs anwenden zu können. Heflin und Pan verstehen beispielsweise unter einer Interpretation \mathcal{I} ein *Modell einer Ontologie O im Kontext eines Semantic-Web-Bereichs* bestehend aus O referenzierenden TBoxen und ABoxen gdw. 1) \mathcal{I} ist Modell von O . 2) \mathcal{I} ist (Teil-)Modell von jeder Ressource r , die an die Ontologie O oder O erweiternden Ontologie gebunden ist (etwa durch Import der Ontologie O). 3) \mathcal{I} ist Modell von jeder Ressource r die an eine zu O abwärtskompatiblen Ontologie gebunden ist. Sowie 4) \mathcal{I} ist (Teil-)Modell von jeder Ressource r die an eine abwärtskompatiblen Ontologie einer O erweiternden Ontologie gebunden ist [Heflin und Pan, 2004, S. 69]. Die Modellmenge einer Ontologie wird nach dieser Definition geschnitten mit den Modellmengen aller zur Ontologie kompatiblen Ressourcen. Die für das Versioning problematische Lücke zwischen den formalen Modellen einerseits und den intendierten Modellen andererseits wird in diesem Ansatz unter Rückgriff auf Anwendungsdaten verkleinert. Mit der dezentralen Modell-Konzeption ohne zentrale Kontrolle, sondern mit individuell wählbaren Bereichen (Semantic Web-Ausschnitten) wird dieser Ansatz der heterogenen, und autonom entstehenden Informationsverteilung im Netz gerecht.

Während im Formalismus der reinen Beschreibungslogik noch keine Unterstützung für die Versionierung von Ontologien vorgesehen war, erhält diese Problematik inzwischen breitere Aufmerksamkeit. OWL als größter gemeinsamer Nenner der Ontologieentwicklung ist konzeptionell wie semantisch auf dem Stand von SHOE [Heflin u. a., 1999], einem der ersten Ontologieformalismen des Semantic Webs. Neue, wie die beiden geschilderten

Ansätze sind dagegen Resultate der Forschung. Notwendig scheint auf diesem Gebiet vor allem ein konzeptioneller Konsens. Ohne eine gemeinsam akzeptierte begriffliche Unterscheidung von Ontologie als Version und Ontologie als Entwicklungslinie ist ein Einzug in Standardformalismen nicht zu erwarten. In der Semantik von verteilten Informationssystemen mit sich wandelnden Ontologien ist ein Standard erst zu erwarten, wenn der Modellbegriff frei von impliziten Annahmen der Verwendung der Ontologien ist.

4.3.4 Ontology Merging

Definition 4.13. *Ontology merging* heißt die Verschmelzung mehrerer Ontologien zu einer neuen möglichst kompakten Ontologie bei gleichzeitigem weitestgehendem Erhalt der jeweiligen konzeptionellen Erkenntniswerte [Sowa, 2005]. Die neue Ontologie ersetzt die ursprünglichen Ontologien. [Ding u. a., 2002, S. 218]

Ontology merging weist Parallelen zum *ontology aligning* auf, wobei im *ontology matching* keine Zuordnung zwischen den Vokabularen der Ursprungs- und Zielontologie hergestellt werden braucht. Als einen Zwischenschritt beinhaltet der Prozess des Mergens zweier Ontologien in der Regel die Erzeugung eines Alignments [Ding u. a., 2002, S. 218]. Da die Zielontologie nicht kompatibel zu den Ausgangsontologien sein braucht, kann sie nicht direkt an Stelle der Ausgangsontologien eingesetzt werden. Stattdessen erfordert ein Merging zweier Ontologien eine Migration aller Datenbasen die an die Ausgangsontologien gebunden sind, auf die Zielontologie. Ein typischer Anwendungsfall des *ontology mergings* ist die Fusion mehrerer Parteien (z.B. Unternehmen oder Informationsanbieter) welche bisher mit jeweils eigenen Ontologien dieselbe Domäne konzeptionalisiert und spezifiziert haben. Ziel in dieser Situation ist nicht, beide Datenbestände parallel fortzuführen und dauerhaft übersetzbar zu halten, sondern Ontologien und Datenbestände möglichst informationsverlußtfrei zu vereinen.

Voraussetzung für sinnvolles *ontology merging* ist, daß die beteiligten Ontologien über ähnlichen Domänen modelliert wurden. Verschiedene Konzeptionalisierungen ähnlicher Domänen können sich im Wesentlichen auf zwei Arten unterscheiden: Zum einen können verschiedene Bereiche verschieden stark detailliert konzeptionalisiert sein. Zum anderen können Ontologien verschiedene Ränder des jeweils konzeptionalisierten Bereiches ausweisen, die Domäne also unterschiedlich weit fassen. Prinzipiell kann zwischen zwei Arten auf differierende Domänen reagiert werden [Bruijn u. a., 2004, S. 7]:

In der *Vereinigung (union)* halten alle Entitäten der Quellontologien Einzug in die Zielontologie. Eine Ausnahme bilden verschiedene Entitäten, die für dasselbe Konzept stehen – sie werden nur durch eine Entität in der Zielontologie dargestellt. Im anderen Ansatz des *Schnittes (intersection)* werden nur solche Teile der Quellontologien übernommen, welche überlappen. Es liegt auf der Hand, daß die Methode des Schnittes praktisch immer zu zu kleinen Ontologien führt, d.h. daß die Schnitt-Ontologie einem darauf aufzubauenden Wissensbestand nicht gerecht wird. Das Problem mit der Vereinigung ist, daß selbst wenn zwei Konzeptionalisierungen von gleicher Ausdrucksstärke sind, sich ihre einzelnen Konzepte nicht decken müssen. Jedem Konzept der einen Ontologie kann daher eine Mischung aus Konzepten der anderen Ontologie entsprechen. In dieser Situation ergibt

die Vereinigung der Klassen beider Ontologien eine disjunkte Vereinigung von Klassen. Im Resultat ergibt das eine unverhältnismäßig große Gesamtontologie, die zudem nicht mehr minimal ist. Zum Ziel führt ein Mittelweg zwischen beiden Ansätzen. Dieser kann unter Umständen eine Umsystematisierung der Konzeptionen der beteiligten Ontologien sein.

Die Aufgabenstellung des *ontology mergings* ist in der Vergangenheit größtenteils manuell angegangen worden [Noy und Musen, 2000, S. 1]. Für große Ontologien ist dieser Ansatz nur schwer realisierbar. Das Feld technischer Unterstützungen reicht von einer bequemerem interaktiven graphischen Arbeitsumgebung (mitunter erweitert durch Konsistenztests) bis hin zu halbautomatischen Verfahren. PROMPT [Noy und Musen, 2000] ist ein Paket von Werkzeugen für die verschiedenen Aufgaben des Ontology-Managements mit mehreren Ontologien. Dessen Autoren stellten fest, daß die verschiedenen Management-Aufgaben in einem engen Verhältnis zu immer wiederkehrenden Grundfunktionalitäten liegen. Die verschiedenen Funktionalitäten sind als Erweiterungen zur Protégé-Ontologie-Entwicklungsumgebung entwickelt. ONIONS [Gangemi u. a., 1999] ist ein Workflow der durch sein Befolgen sicherstellen soll, daß Abhängigkeiten in den involvierten Entscheidungen linearisiert werden, so daß der Aufwand der Revision an der erzeugten Ontologie gering ist. FCA-Merge [Stumme und Maedche, 2001] basiert im Kern auf Formaler Begriffsanalyse. Dabei bilden Konzepte und deren Extensionen eine Einheit, die die Bestimmung von Konzept-Suprema und -Infima erlaubt. Extensionen in der Betrachtung von Konzepten verschiedener Ontologien bilden Fachdokumente, welche die jeweiligen Konzepte beinhalten. Weisen zwei Klassennamen zweier Ontologien Vorkommen in den selben Dokumenten auf, können die Klassen identifiziert werden. Ähnlich sind Verhältnisse von Subsumtion und Supremum zwischen Konzepten bestimmbar.

4.4 Die diachronische Struktur Formaler Ontologien

4.4.1 Vorbetrachtung und Motivation

Die Ansätze zur Beschreibung von Wandel im Semantic Web und im Strukturalismus unterscheiden sich teilweise stark. Ein Vergleich beider Welten gestaltet sich umso schwieriger, da die Begrifflichkeiten formaler Ontologien bezüglich Wandel noch stark ambig sind. So kann der Name einer Ontologie für eine konkrete Version der Ontologie, für den Verlauf aller Versionen, für die letzte Version, für die dahinterstehende Konzeption, oder für eine konkrete textuelle Repräsentation stehen. Der Ontologiebegriff ist damit ähnlich mehrdeutig wie der allgemeine der Theorie. Die Entwicklung einer Ontologie über die Zeit hinweg ist zudem eine bisweilen abstrakte Entität, die sich nicht innerhalb der Ontologien selbst findet, wohl aber in deren Kontext. Hinter der *Entwicklung einer Ontologie* läßt sich neben den Versionen einer Ontologie – also Dateien von Text – prinzipiell alles zählen, was zu ihrer Entwicklungsgeschichte zu sagen ist. Da diese reale Entwicklungsgeschichte im Prinzip unerschöpflich ist, muß es bei deren Beschreibung um die Rekonstruktion der Entwicklung einer Ontologie gehen. Diese wird an einigen Stellen mehr als den Inhalt der Ontologien umfassen, an anderen Stellen weniger. Das Programm besteht damit darin, solche Aspekte zu rekonstruieren, welche zur Definition

von Gütekriterien oder Entwicklungsmustern bereits *adäquat* sind.

In den folgenden Abschnitten zu den einzelnen Aspekten der Rekonstruktion stellt sich jeweils eine allgemeine Frage: Wie fein soll die Rekonstruktion granuliert sein? Zählt jede Änderung an einer Ontologie als historische Periode, ist jeder Anwender als eine Generation zu verstehen, ist jede Änderung eine nennenswerte Spezialisierung? Hier ist die Lage der klassischen Beispiele der Strukturalisten aus der Physik womöglich eine andere, als in den Bereichen des Semantic Webs: Klassische physikalische Gesetze sind universell und prägnant. Datengetriebene Anwendungen haben mit vielen speziellen Fällen und Einsatzszenarien zu tun. Die Granularität zeichnet sich daher nicht so natürlich ab, wie innerhalb eines Paradigmas der Physik. Stattdessen ist es eine kreative Leistung der Rekonstruktion, Schnitte zu setzen um geeignete Abgrenzungen deutlich zu machen. So muß eine Ontologie nicht in kompletter Fülle durch ein Theorieelement repräsentiert sein. Ein resultierendes Theorieelement ist in der Regel unbrauchbar groß und wird nur schwer monoton zu spezialisieren sein. Abstraktion innerhalb der Rekonstruktion ist für die Erklärung von Zusammenhängen sinnvoll und womöglich unerlässlich. Rekonstruktion öffnet im Gegensatz zur Übersetzung bzw. einer formalen Interpretation die Möglichkeit zur Abstraktion.

Zur Übertragung der strukturalistischen Theoriekonzeption auf formale Ontologien zeigen sich einige Konzepte von zentraler Bedeutung. a) Die Unterscheidung in einen wesentlichen Kern und einen durch Spezialisierung ausdifferenzierten äußeren Teil. Mit der Spezialisierung werden zusätzlich zum Kern Anpassungen – also weitere Annahmen und weitere Terme – angenommen. b) Die Anwender einer Theorie werden zum mitmodellierten Teil von Theorieelementen. c) Die Historie einer formalen Ontologie setzt sich aus historischen Perioden zusammen, die für die Beschreibung der Entwicklung als markant eingestuft werden. d) Theorieevolution ist eine Eigenschaft welche die Rekonstruktion eines Zusammenhangs historischer Perioden bestimmt.

4.4.2 Synchronische Betrachtung von Ontologie-Wandel

In einer *synchronischen* Rekonstruktion einer Theorie bzw. einer Ontologie wird der Zustand einer Entwicklung zu einem Zeitpunkt beziehungsweise während eines ausgewählten Zeitintervalls beschreiben. In strukturalistischer Sprechweise wird der Zustand während einer *Historischen Periode* rekonstruiert. Verschiedene Varianten oder Versionen einer formalen Ontologie, die während einer historischen Periode tatsächlich Verwendung finden, sollen im Weiteren *aktiv* heißen und in die synchronische Rekonstruktion einfließen. *Passive* Versionen und Varianten bestehen zwar in Anschluß an frühere Periode weiter, ihr Einsatz gilt aber nicht mehr als relevant. Während einer historischen Periode sind in der Regel mehrere Varianten oder Versionen einer Ontologie aktiv. Um diese in einer gemeinsamen Rekonstruktion unterzubringen, reicht ein einzelnes Theorieelement nicht mehr aus. Für die Rekonstruktion mehrerer gleichzeitig aktiver Varianten und Versionen einer Ontologie empfiehlt sich die Rekonstruktion als Theorienetz. Sei \mathcal{O} eine Ontologie mit mehreren in einer zu rekonstruierenden Periode aktiven Versionen O_1, \dots, O_n . Das daraus zu rekonstruierende Netz $N = \langle |T|, \sigma \rangle$ umfasse eine Menge $|T|$ von Theorieelementen die über die Spezialisierungsrelation σ ins Verhältnis gesetzt werden ist.

Die Anzahl n von während einer historischen Periode aktiven Versionen und Subver-

sionen O_1, \dots, O_n einer Ontologie \mathcal{O} kann ein Netz unübersichtlich groß machen. Da eine Vielzahl von minimalen Änderungen zwischen Versionen einer formalen Ontologie das Gesamtverständnis erschweren kann, ist eine direkte Übersetzung von aktiven Ontologieversionen und -varianten O_1, \dots, O_n in Theorieelemente T_1, \dots, T_n nicht unbedingt empfehlenswert. Stattdessen sollten Ontologieversionen und -varianten, die im Wesentlichen dieselben Commitments umfassen, in Theorieelementen zusammengefaßt werden. Zur Rekonstruktion durch ein Theorie-Netz N , sind die folgenden Fragen zu beantworten:

1. Was ist das minimale Commitment?
2. Welche weiteren Commitments werden vertreten?
3. In welchem Verhältnis stehen die Commitments zum minimalen Commitment und untereinander?

Das Minimale Commitment: Das minimale Commitment von während einer historischen Periode aktiven Versionen O_1, \dots, O_n einer formalen Ontologie sind diejenigen konzeptionellen Entscheidungen, welche innerhalb aller Versionen und Varianten O_1, \dots, O_n einer Ontologie geteilt werden. Dabei handelt es sich mindestens um die relevanten atomaren Terme N_C, N_R, N_I samt deren grundlegenden taxonomischen Verhältnisse in Form von Termeinführungen I . In der Rekonstruktion als Ontologie-Netz N wird das beschriebene minimale Commitment aus N_C, N_R, N_I, I der Ontologien O_1, \dots, O_n als Theorieelement in der Rolle des Fundamentelementes T_0 des Netzes N repräsentiert. Das Fundamentelement T_0 eines Theorienetzes muß damit nicht einer tatsächlichen Ontologieversion oder -variante O_1, \dots, O_n entsprechen. Es faßt nur den minimalen Konsens aller Versionen und Varianten zusammen, der – wenn er verlassen – auch zum verlassen des Netz führte.

Bestimmung der entscheidenden weiteren Commitments: Folgt man streng dem ersten Kapitel in welchem Ontologien durch Theorieelemente repräsentiert werden, hieße das jede zum betrachteten Zeitpunkt bestehende Version und Variante einer Ontologie als Theorieelement in das Netz aufzunehmen. In einer ersten Vereinfachung empfiehlt es sich, nur aktive Ontologieversionen - und Varianten O_1, \dots, O_n von \mathcal{O} zu betrachten. In einem zweiten Abstraktionsschritt werden die aktiven Ontologien O_1, \dots, O_n als Theorieelement-Kandidaten T_1, \dots, T_n des Netzes N rekonstruiert. Während einige der T_1, \dots, T_n für eine Gesamtbetrachtung irrelevant sind und nicht in das Netz N übernommen werden sollten, können Schnittmengen der Axiome von Ontologien O_1, \dots, O_n wichtige gemeinsame Commitments repräsentieren. Seien T'_1, \dots, T'_m Theorieelemente als Auswahl von T_1, \dots, T_n sowie unter Hinzunahme von Schnittmengen-Ontologien. Jedes der Theorieelemente markiert eine Menge *konzeptioneller Entscheidungen*, die im Zuge der Ontologieentwicklung getroffen wurde und für das Gesamtbild als wesentlich erachtet werden kann.

Einordnung gemäß Spezialisierungsgrad Zwischen Mengen von konzeptionellen Entscheidungen können verschiedene Verhältnisse bestehen. Im Fall der Spezialisierung stehen

Mengen von Commitments in einem Implikationsverhältnis. Innerhalb des Netzes liegen die spezialisierten Theorieelemente auf einem Wurzelpfad zum Fundamentelement (dem minimalen Commitment). Besteht die Spezialisierungsrelation zwischen zwei Theorieelementen nicht, liegen beide auf verschiedenen Wurzelpfaden zum Fundamentelement.

Werden die m potentiellen Theorieelemente bezüglich Spezialisierung partiell geordnet, bildet $\langle \{T'_1, \dots, T'_m\}, \sigma \rangle$ ein Theorienetz.

Eigenschaften: Folgt man in einem Theorienetz Wurzelpfaden ausgehend vom Fundamentelement, so nehmen die Mengen von Commitments an Größe zu, die Mengen aktueller Modelle nehmen ab. Das Ziel hinter der Entstehung eines jeden Pfades ist, die Menge aktueller Modelle gegen die Menge intendierter Anwendungen konvergieren zu lassen. Jeder Wurzelpfad faßt ein verschieden stark ausgeprägtes ontologischen Commitment zusammen.

Eine Ontologie, synchronisch rekonstruiert durch ein Theorienetz, erlaubt damit eine Darstellung von mehreren Phänomenen, die sich über die Zeit einer Ontologie-Weiterentwicklung beobachten lassen: Zum einen eine Bewegung zwischen verschiedenen starken Spezifikationen einer Konzeptionalisierung. Hier werden die verschiedenen Anforderungen an den Grad an Formalität und semantischer Stärke einer Ontologie deutlich. Zum anderen wird die Relevanz verschiedener unterschiedlicher Commitments deutlich.

Beispiel 4.3. Gegeben sei eine Ontologie \mathcal{O} in drei Ontologie-Versionen, repräsentiert durch Tupel $\langle N_C, N_R, N_I, AL_C, AL_R, I, R, A \rangle$ gemäß Definition 2.13.

$$\begin{aligned} O_1 &= \langle \{A, B\}, \emptyset, \emptyset, \{A \sqsubseteq B\}, \emptyset, \emptyset, \emptyset, \emptyset \rangle \\ O_2 &= \langle \{B, C\}, \emptyset, \emptyset, \{B \sqsubseteq C\}, \emptyset, \emptyset, \emptyset, \emptyset \rangle \\ O_3 &= \langle \{A, B\}, \emptyset, \emptyset, \{A \sqsubseteq C, B \sqsubseteq C, A \sqsubseteq B\}, \emptyset, \emptyset, \emptyset, \emptyset \rangle \end{aligned}$$

Das fundamentale Commitment aller drei Ontologien besteht in der Deklaration dreier toplevel-Klassen A, B und C und wird als fundamentales Theorieelement T_0 des Netzes N geführt. Die spezifischeren Termeinführungen von O_1 und O_2 seinen durch Theorieelemente T_1 und T_2 rekonstruiert. Beide stehen zueinander in keinem Spezialisierungsverhältnis, da sie nicht inkomensurabel sind, kann es Theorieelemente geben, die sowohl Spezialisierung von T_1 , als auch von T_2 sind. Die Rekonstruktion von O_3 durch ein Theorieelement T_3 ist eine solche Spezialisierung von T_1 und T_2 . Die Axiome und die Spezialisierungsverhältnisse der vier Theorieelemente ist in Abbildung 4.5 graphisch dargestellt.

Beispiel 4.4. Gegeben seien eine Ontologie O_1 sowie eine daraus evolvierte Ontologie O_2 :

O_1 :

$$\begin{aligned} \text{Food} &\sqsubseteq \top \\ \text{LiquidFood} &\sqsubseteq \text{Food} \\ \text{Wine} &\sqsubseteq \text{LiquidFood} \end{aligned}$$

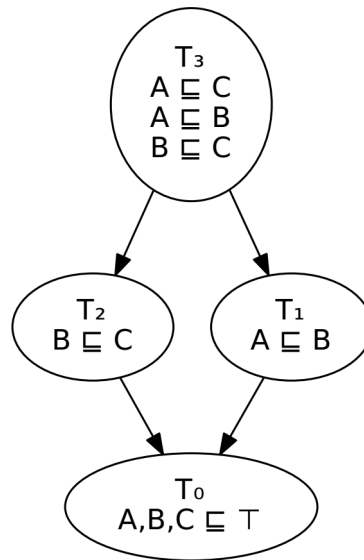


Abbildung 4.5: Ein Netz N von Spezialisierung zwischen verschiedenen starken Commitments.

O_2 :

$\text{ConsumeableThing} \sqsubseteq \top$
 $\text{Food} \sqsubseteq \text{ConsumeableThing}$
 $\text{LiquidFood} \sqsubseteq \text{Food}$
 $\text{Wine} \sqsubseteq \text{LiquidFood}$

Zur Rekonstruktion von O_1 und O_2 innerhalb eines Netzes N ist zuerst die Struktur deren potentieller Modelle zu rekonstruieren. Für sich allein betrachtet besitzen beide Ontologien je eine kategoriale Klasse (**Food** beziehungsweise **ConsumeableThing**). In der Rekonstruktion beider Ontologien als Theorieelemente innerhalb eines Netzes, ist zu entscheiden, über welchen prinzipiellen Domänen Aussagen formuliert werden können sollen. In der gegebenen Darstellung ist nicht erkenntlich, ob die intendierte Domäne von O_1 und O_2 Nahrungsmittel oder Konsumierbares ist. Unabhängig von dieser Entscheidung werden nicht nur die Signaturen beider Ontologien angeglichen, sondern auch die Axiomatik beider Ontologien fällt dadurch zusammen. Beide Ontologien O_1 und O_2 werden im Netz N als genau ein Theorieelement rekonstruiert.

Ein Ziel der Erstellung formaler Ontologien ist die Vereinheitlichung des Sprachgebrauchs innerhalb einer Gemeinschaft [Smith und Kumar, 2004]. Eine Aufspaltung innerhalb von Theorienetzen läuft dem unächst zuwider. Wünschenswert ist in Anbetracht von Vereinheitlichung ein Theorienetz von nur einem Theorieelement. Dem globalen Wunsch nach Einheit stehen allerdings stets konkrete Erfordernisse spezifischer Anwendungen entgegen.

1) Zum einen können das regionale, bereits fest etablierte Unterschiede sein. Das Spektrum reicht hier von verschiedenen nationalen Anpassungen der IDC-10 (siehe Abschnitt 4.4.4) bis zur geschützten Verwendung des Wortes *Wein* in verschiedenen

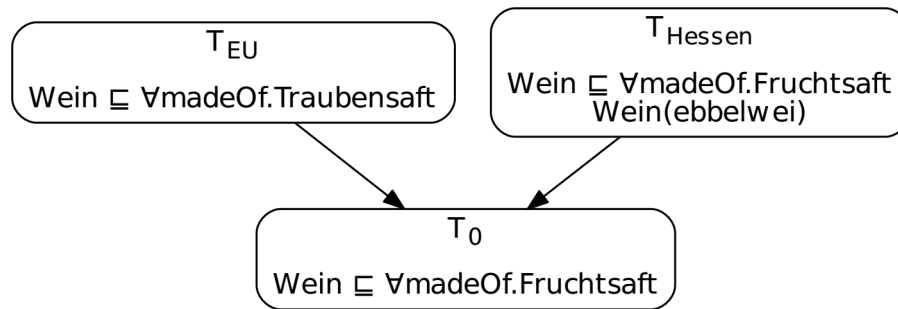


Abbildung 4.6: Theorieelemente zur regional angepassten Verwendungsweise des Wortes ‚Wein.‘

Regionen Deutschlands [hmk. u. a., 2007]. Ein gewachsener Sprachgebrauch läßt sich nur schwer durch eine neue Sprachkonvention, sei es durch eine formale Ontologie oder gesetzliche Regularien diktieren. In einem Theorienetz lassen sich fest verschieden etablierte Wortverwendungen durch eine Bifurkation rekonstruieren (siehe Abbildung 4.6). Aufbauend auf allgemein akzeptierten Annahmen spalten sich einander widerstrebende Annahmen baumartig auf.

2) Zum anderen können verschiedene Einsatzszenarien verschiedene Grade an Formalität verlangen. Insbesondere der Umgang mit extrem großen Datenmengen verlangt nach Formalismen mit erwartbar niedriger Komplexität zur Beantwortung von Anfragen (siehe den fachspezifischen Formalismus in SNOMED-CT [Bodenreider u. a., 2007]). Innerhalb der Semantic-Web-Community spiegelte sich der trade-of aus Aussagekraft und Skalierbarkeit in einer Debatte um neue Sprachvarianten innerhalb der OWL2-Sprachfamilien wieder [Baader u. a., 2010, S. 2]. Der Grad an Formalität einer Ontologie ist nicht (allein) der Domäne geschuldet ist, sondern auch dem Zweck Ihrer Verwendung. Im Bild der Theorienetze heißt das, Pfade ausgehend vom Fundamentelement mit minimaler Formalisierung hin zu Elementen mit hoher Formalisierung bilden Kompromisse zwischen verschiedenen Nutzungsszenarien einer Ontologie ab.

In einem Verständnis von Ontologien als Theorienetz lassen sich die zentralen, widerstrebenden Anforderungen in Einklang bringen: Die Vereinheitlichung von Sprachgebrauch bei gleichzeitiger Anpassbarkeit an individuelle Erfordernisse.

4.4.3 Diachronische Betrachtung von Ontologie-Wandel

Hinter dem Begriff *Evolution* lassen sich verschiedene Verwendungsweisen ausmachen [Thomson, 1982]: (a) Evolution in einem *ontologischen* Sinn steht für ein Merkmal eines beobachtbaren Prozesses, für einen spezifischen Typus von Prozess in der Welt. (b) Insbesondere im Fall der *biologischen* Evolutionstheorie geht diese Begriffsverwendung mit einer These über die Entwicklungsgeschichte in der Welt einher. (c) Weiterhin findet Evolution Verwendung als *Erklärungsmuster* zur Vermittlung von Verständnis einer Entwicklung. Während in der einschlägigen Diskussion zur Ontologieentwicklung die erste Verwendungsweise vertreten wird, soll in dieser Arbeit die Perspektive der dritten, *epistemischen* Bedeutung von Evolution Anwendung finden.

Konkret heißt das auch, daß in dieser Arbeit die ontologische These, ob sich Ontologien

tatsächlich evolutionär entwickeln, nicht diskutiert werden soll. Stattdessen wird in diesem Kapitel die epistemische These betont, nach der das Einnehmen einer evolutionären Sichtweise der Entwicklung von Ontologien von Vorteil für deren Verständnis ist. Aus dem Verzicht auf eine ontologische These der Ontologie-Evolution ergibt sich gleichzeitig die neue Problemstellung, daß die Bestandteile einer evolutionären Erklärung – Generation, Veränderung, Überleben – nicht bereits gegeben sind, sondern in einem kreativen Akt gewonnen werden müssen. In strukturalistischen Worten handelt es sich bei den zentralen Konzepten um historische Perioden, Communities, diachronische Theorieelemente, diachronische Spezialisierung (Abstammung) und Spezialisierung (Taxonomie).

Rekonstruktion diachronischer Grundbegriffe der Ontologieentwicklung

Historische Perioden: Ähnlich der Phylogenetik, in der nicht alle Generationen von Individuen einzeln betrachtet werden, sondern die Entwicklung über Zeitalter hinweg, sollen in dieser diachronischen Betrachtung von Ontologien nicht alle einzelnen Versionen in ihrem manchmal stündlichen Erscheinen betrachtet werden, sondern in Form markanter Zeitabschnitte (*historischer Perioden*). Wann eine historische Periode beginnt und wann sie endet, läßt sich mit Verweis auf das nicht-ontologische Verständnis nicht an konkreten Ereigniskriterien festmachen, sondern hängt stark von den Erfordernissen der Rekonstruktion ab. So ist für die Rekonstruktion der Entwicklung einer Ontologie eine Einteilung in drei historische Perioden, z.B. in frühe, mittlere und reife Phase denkbar, aber auch eine wesentlich feinere Aufteilung in Perioden von Hauptversionen oder Kalenderjahren.

Im Fall einer inhaltlich motivierten Bestimmung der historischen Perioden, ergibt sich die Frage nach einem Kriterium zu deren exakten Grenzziehung. Diese Trennlinie hängt im Einzelnen mit der inhaltlichen Rekonstruktion einer historischen Periode und mit dem Zusammenspiel der benachbarten Perioden zusammen. Methoden zur Rekonstruktion von Ontologieentwicklung können damit nicht vollständig *top-down* – also von historischen Perioden, hin zu Details einzelner Modelle – erfolgen.

Communities und Commitments: Die Strukturalistische Auffassung unterscheidet drei pragmatische Konzepte von Theorien: Wissenschaftler (als Menge **SOPH**), wissenschaftliche Gemeinschaften (als Menge **SC**) und wissenschaftliche Generationen (als Menge **G**). In Übertragung auf formale Ontologien sind alle Anwender und Urheber von Ontologien Wissenschaftler im Sinne von **SOPH**, nämlich Anhänger einer terminologischen Theorie. Die Community hinter einer Ontologie ist im übertragenem Sinne eine wissenschaftliche Gemeinschaft **SC** und der aktuelle Bestand einer Community die Generation **G**. Ziel der strukturalistischen Rekonstruktion ist, die Entwicklungsgeschichte einer Ontologie als Evolution genau einer Wissenschaftlichen Gemeinschaft über historische Perioden hinweg zu zeichnen.

Commitments und Theorieelemente: In Übertragung der strukturalistischen Theoriekonstruktion wird das Verhältnis einer Generation und einer Theorie beziehungsweise einem Commitment in Form eines Tripels dargestellt. Eine gegenwärtige Generation **G** einer Community **SC** verwendet eine Ontologie **K** für einen Anwendungsbereich **I**, kurz $\langle \mathbf{K}, \mathbf{G}, \mathbf{I} \rangle$. Das Tupel heißt $\langle \mathbf{K}, \mathbf{G}, \mathbf{I} \rangle$ heißt diachronisch erweitertes Theorieelement **T**.

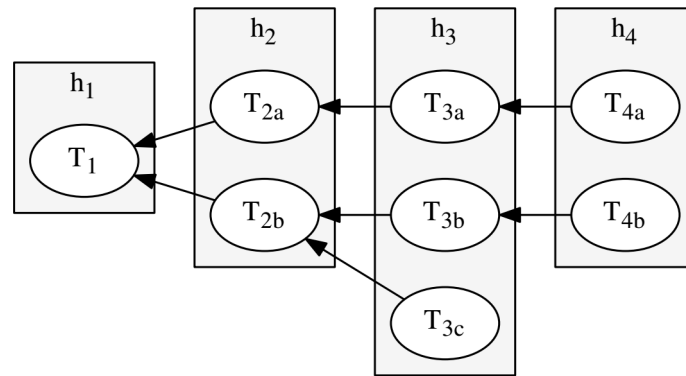


Abbildung 4.7: Theorieevolution zweier Varianten ,a‘, ,b‘ und ,c‘.

Spezialisierung und Abstammung: Die diachronische Spezialisierung ist von zentraler Bedeutung für die Rekonstruktion von Entwicklung, da mit ihr die Entstehungslinien von bzw. innerhalb von Ontologien nachgezeichnet werden können. Die diachronische Spezialisierung gibt ein Verhältnis zwischen Theorieelementen an. Prinzipiell lassen sich zwei Verwendungsweisen einer Spezialisierungsrelation unterscheiden: Zum einen zwischen Theorieelementen derselben historischen Periode, also desselben Theorienetzes, zum anderen, zwischen Theorieelementen verschiedener historischer Perioden. Die Spezialisierung dient also zum einen der Rekonstruktion historischer Abstammung, und zum anderen auch zur Kennzeichnung von Varianten-Beziehungen innerhalb einer historischen Periode.

Evolution: Mit der Übertragung der Grundkonzepte einer Diachronischen Theoriekonstruktion auf Ontologien läßt sich auch das Konzept der Theorie-Evolution (Def. 4.9) direkt auf Ontologien übertragen. Bei der Theorieevolution handelt es sich um eine endliche Sequenz von Theorienetzen, wobei zwischen direkt aufeinander folgenden Netzen folgendes gilt: Jedes Theorieelement des nachfolgenden Netzes steht in diachronischer Spezialisierungsrelation zu einem Theorieelement des vorausgehenden Netzes. Jede Variante einer strukturalistisch verstandenen Ontologie innerhalb einer Entwicklungsperiode, muß damit – sofern es eine vorausgehende Periode gibt – von einer Variante der vorausgehenden Periode abstammen (in diachronischer Spezialisierungsrelation σ_d) stehen. Das heißt insbesondere, daß sie der selben Community entspringen.

Die diachronische Spezialisierungsrelation σ_d ist nicht transitiv. Das heißt auch, daß nicht alle Eigenschaften von in einer Spezialisierungsreihe stehenden Theorieelementen jeweils weitergegeben werden. Die Bedeutung eines Fundamentelements innerhalb eines Theorienetzes ist damit geringer als in einem synchronischen Theorienetz: Selbst wenn die Fundamentelemente benachbarter Netze diachronische Spezialisierungen sind, muß dies nicht auch für alle Elemente der jeweiligen Netze gelten. Das kann als Grund dafür gelten, daß für diachronischen Theorienetze kein Fundamentelement gefordert wird. Damit wird eine Entwicklung zweier Theorie- bzw. Ontologievarianten denkbar, die in Spezialisierung eines Urelementes entstehen und sich so lange parallel nebeneinander entwickeln, bis sie keinen Anwendungsfall mehr gemeinsam haben (siehe die Entwicklungslinie $T_1, T_{2a}, T_{3a}, T_{4a}$ und $T_1, T_{2b}, T_{3b}, T_{4b}$ in Abbildung 4.7). Teilontologien dürfen in der Netzentwicklung verschwinden, wenn auf sie in der weiteren Entwicklung

kein Bezug mehr genommen wird und wenn die Generation G_i des neuen Netzes die Commitments der Teilontologie nicht mehr trägt (siehe das Element T_{3c} in Abbildung 4.7). Während synchronische Theorienetze durch Hinzufügen von Annahmen monoton wachsen, können Netze über historische Perioden hinweg schrumpfen. Dafür ist keine empirische Widerlegung sondern lediglich ein Nicht-Gebrauch von vormalig gebrauchten Theorieelementen verantwortlich – ein diachronisches Netz schrumpft dann um das verweiste Theorieelement.

Kuhnsche Theorieevolution: Die Vorstellung von Genidentität ist mit einer Auseinandersetzung um das verbunden, was das Wesen eines betrachteten Gegenstandes ist, bzw. was notwendig zu ihm gehört. Erst damit läßt sich entscheiden, bei welchen Veränderungen im Laufe einer Entwicklung aus etwas Altem, etwas Neues hervorgeht, das eben nicht mehr nur das Alte ist.

Die strukturalistische Konzeption des Wesens einer Theorien soll hier auf formale Ontologien übertragen werden. Demnach wird eine Theorie unterschieden in a) die Merkmale in denen ein Anwendungsbereich wahrgenommen bzw. charakterisiert wird (potentielle Modelle), b) die Gesetzmäßigkeiten, welche zwischen den Merkmalen ausgemacht werden (aktuelle Modelle, Constraints, Links), sowie c) die intendierten Anwendungen einer Theorie. Daß es sinnvoll ist, neben Theorien auch Ontologien in diesen Dimensionen zu verstehen, sollte in den vorhergehenden Kapiteln wahrscheinlich gemacht werden.

Genidentität im Kontext von Theorieevolution wird gemäß obiger Theoriebestandteile wie folgt charakterisiert: Die Beobachtungsmerkmale (potentielle Modelle) einer Theorie müssen im Laufe einer Theorieevolution unverändert bleiben. Gesetzmäßigkeiten dürfen im Laufe der Evolution hinzugenommen werden und können im Fall verwaister, absterbender Äste auch wieder abgebaut werden. Entwicklungslinien von Theorieelementen wachsen ausschließlich monoton, dürfen aber auslaufen. Die intendierten Anwendungen einer Theorie bzw. Ontologie dürfen sich von historischer Periode zu historischer Periode ändern und brauchen sich dabei lediglich überlappen. Die Menge der Anwendungen einer Ontologie/Theorien braucht im Laufe einer Entwicklung also nicht an die nachfolgende Generation vererbt zu werden.

Eine verschärfte Form der Theorieevolution stellt die Paradigma-getriebene Evolution dar. Zusätzlich zu den Eigenschaften der Theorieevolution muß hier jedes Theorieelement Spezialisierung eines global ausgezeichneten Theorieelementes sein. Das *Paradigma* genannte Theorieelement wird von den Anwendern aller Theorieelementen innerhalb der Entwicklung geteilt. Das Paradigma beinhaltet insbesondere eine Menge I_0 intendierter Anwendungen von paradigmatischen Beispielen. Die Konzeption der Kuhnschen Theorieevolution läßt sich auch auf die Entwicklung formaler Ontologien übertragen. Gibt es in der Entwicklung einer Ontologie Commitments und intendierte Anwendungsfälle, die in jeder Variante und Version zutreffen, ist eine Ontologieevolution Kuhnsch. In der Deutung formaler Ontologien als Spezifikation eines Sprachgebrauchs sind die paradigmatischen Anwendungen I_0 ausgewiesene Dokumente, deren Sprachgebrauch von allen Vertretern einer Entwicklung zugehörigen Ontologien geteilt wird.

Rekonstruktions-Methodik

Die Spezialisierungsrelation ist eine mengentheoretisch vollständig definierte und domänenunabhängige Eigenschaft über Paaren von Theorieelementen. Die (Re-)Konstruktion eines Theorienetzes kann damit nicht durch ein ad-hoc in-Beziehung-Setzen von Theorieelementen geschehen, sondern die Theorieelemente müssen derart eingerichtet sein, daß sie in der gewünschten Spezialisierungsrelation stehen und sich insgesamt die gewünschte Netzstruktur ergibt. Gleiches gilt für die Eigenschaft der Theorieevolution – sie besteht im Wesentlichen aus einer Spezialisierung entlang historischer Perioden. Wird für eine gegebene Serie von Netzen die Eigenschaft einer Theorieevolution angestrebt, muß auch hier die Eigenschaft bereits in den Theorieelementen angelegt sein. Da das Ziel im strukturalistischen Theorieverständnis darin besteht, einen Entwicklungsverlauf als Evolution darzustellen, selbst dann, wenn er es selbst nicht unbedingt *ist*, zeichnet es sich als schwer durchführbar ab, dies in nur einer Iteration einzurichten. Die Entscheidung, ob die Hinzunahme eines Theorieelements in ein Theorienetz sinnvoll ist, oder sich nur schwer in einen Evolutionsverlauf einordnen läßt, ist zu Beginn einer Rekonstruktion nur schwer zu treffen.

Die Schwierigkeit, mit Hilfe lokaler Anpassungen eine globale Eigenschaft einzurichten, besteht ebenso für die Festlegung historischer Perioden: Zum einen ist es zwar möglich, eine Theorieevolution, bestehend aus nur einer einzigen historischen Periode zu konstruieren, diese bietet jedoch keinen Erkenntnisgewinn. Zum anderen läßt sich eine Evolution über einer unpassend hohen Zahl von historischen Perioden rekonstruieren, die im Wesentlichen aus Wiederholungen besteht. Das beste trade-off zwischen den trivialen Extremen, kann letztlich nur in einem Prozess der Verfeinerung gefunden werden. Da es sich in der Entwicklung formaler Ontologien im Sinne von Moulines um kulturelle Artefakte handelt und deren Verständnis erarbeitet werden muß, läßt sich dieser Prozess als *hermeneutische Methode* verstehen (siehe auch [Balzer, 1997]). Unter der Annahme einer Einteilung in historische Perioden und jeweils entscheidender Commitments offenbart sich ein mehr oder weniger schlüssiges Muster das durch erneute Verfeinerung der Annahmen deutlicher gemacht werden kann.

Die hier vorgeschlagene Methodik zur Rekonstruktion der Entwicklung einer Ontologie \mathcal{O} ist im Kern ein iterativer Prozess von vier Schritten.

1. Eine Reihe h_1, h_2, \dots, h_n historischer Perioden der Entwicklung der Ontologie \mathcal{O} wird entworfen (oder verfeinert). Jede Periode umfaßt ein zeitliches Intervall, gegebenenfalls einen Namen sowie mit ihr verknüpfte (prägende) Protagonisten.
2. Für jede bestimmte historische Periode h_i sind die in ihr in \mathcal{O} anzutreffenden entscheidenden Commitments in Form von Theorieelementen zu entwerfen (oder zu verfeinern).
3. Für jede historischen Periode h_i werden die Spezialisierungsverhältnisse der entworfenen Theorieelementen eines Netzes innerhalb von h_i als Theorienetz beurteilt. Wird das Theorienetz durch Einführung von Supremum- oder Infimum-Theorieelementen aussagekräftiger, können diese in Schritt 2 der folgenden Iteration mitaufgenommen werden. Ebenso können marginale Theorieelemente zur Entfernung vorgemerkt

werden. Gehäufte Spezialisierungen $T'\sigma_d T$ die mit einer historischen Ablösung von T durch T' einhergehen, legen eine Repräsentation der historischen Periode h_i durch zwei aufeinanderfolgende Perioden nahe (Schritt 1 der nachfolgenden Iteration).

4. Für alle direkt benachbarten historischen Perioden h_{i-1} , h_i und h_{i+1} werden die Spezialisierungen zwischen den zugehörigen Theorieelementen evaluiert. Ähneln eine historische Periode h_i deren direkten Vorgänger- und Nachfolgerperioden, liegt das eine Tilgung von h_i nahe (Schritt 1 der nachfolgenden Iteration).

Der sich wiederholende Prozess spiegelt das Verständnis einer Ontologieentwicklung von einem Vorverständnis über Phasen der Reifung zu einem tieferen Verständnis des Flusses der Spezifikation einer Ontologie.

4.4.4 Beispiel: ICD

Die Rekonstruktion der Entwicklung einer Ontologie wird in diesem Abschnitt am Beispiel der *International Statistical Classification of Diseases and Related Health Problems* – kurz: ICD – demonstriert (siehe deren aktuelle Ausgabe [World Health Organization, 2016]). Die ICD ist das weltweit verbreitetste Klassifikationssystem von medizinischen Diagnosen.

„A classification of diseases can be defined as a system of categories to which morbid entities are assigned according to established criteria. The purpose of the ICD is to permit systematic recording, analysis, interpretation and comparison of mortality and morbidity data collected in different countries or areas and at different times. The ICD is used to translate diagnoses of diseases and other health problems from words into an alphanumeric code, which permits easy storage, retrieval and analysis of the data.“ [World Health Organization, 2016, S. 3]

Ursprünglich eingeführt für die statistische Erhebung von Todesursachen dient sie inzwischen auch für Zwecke der Abrechnung ärztlicher Leistungen und der computergestützten Diagnose. Die ICD zeigt in ihrer Entwicklung eine Reihe von Merkmalen, die sie für Demonstrationszwecke besonders auszeichnet (siehe dazu [World Health Organization, 2016, Kap. 6]):

- Die Entwicklungsgeschichte der ICD geht bis in das Jahr 1850 zurück. Inzwischen ist sie das möglicher Weise weitverbreitetste formale Begriffssystem überhaupt.
- Neben allen Entwurfsversionen gibt es eine kleine Menge gut dokumentierter offiziell verabschiedeter Versionen.
- Von den neueren ICD-Versionen existieren zusätzlich verschiedene nationale Varianten.
- Medizinische Diagnosen besitzen einen hohen Anteil erkennbar kultureller Konstruktion: Homosexualität, Hypercholesterolemia oder auch technisch voraussetzungsvolle Diagnosen wie z.B. virale Erkrankungen spiegeln die Möglichkeiten und Erfordernisse wieder, die mit Medizin einhergehen.

- Neben dem Grad an Granularität, modellierter Umstände oder der Menge an konkreten benannten Diagnosen hat sich im Laufe der ICD-Entwicklung auch der vorgesehene Anwendungsbereich verschoben.

Es zeichnet sich bereits ab, daß die klassische Konzeption formaler Ontologien zur Abbildung der ICD-Informationen nicht ausreicht. Die strukturalistische Rekonstruktion kann im Rahmen dieses Beispiels und in Anbetracht der Fülle an zugehörigen Dokumenten, lokalisierten und spezialisierten Varianten sowie deren ständigen Aktualisierungen nur im Ansatz erfolgen. Die wesentlichen Aspekte der ICD-Familie werden exemplarisch an der aktuellsten verabschiedeten Variante – der ICD-10 – rekonstruiert.

Die ICD-10 umfaßt zwei Teile. 1) Zum einen ist das ein Kategoriensystem aus Erkrankungen in Form einer Taxonomie von im Wesentlichen drei bis fünf Ebenen. Die über die taxonomischen Verhältnisse hinausgehenden Beschreibungen der Krankungskategorien sind nur halbformal und in medizinischer Sprache angegeben. 2) Außerdem umfaßt die ICD-10 ein explizites Schema zur Kodierung von Erkrankungen und Todesursachen. Ein Beispiel für eine Diagnose samt deren Kodierung ist:

Beispiel 4.5. A17.0†G01* - Tuberculous meningitis. [World Health Organization, 2016, S. 22]

A17.0† – Tuberculosis of nervous system,

G01* – Meningitis in bacterial diseases classified elsewhere.

Lokale versus globale Modellierung der ICD: Die Spezifikation der ICD-10 orientiert sich stark an dem mitentwickelten Codesystem, erfolgt jedoch nicht in einem klassischen Ontologie-Formalismus. Die ICD-10 besitzt damit keine ausgewiesene modelltheoretische Semantik. Sie läßt sich jedoch als die Spezifikation eines globalen, umfassenden Modells verstehen. Modelle mit nur partiellem Anteil am Klassifikationssystem sind nicht von Interesse. Der von Strukturalisten vertretene *non statement view* beruht dagegen auf einer lokalen Modellierung. Darin entspricht jedes Modell einem einzelnen, isolierten Anwendungsfall. Eine Theorie gewinnt ihre Stärke durch die Aggregation aller (lokalen) Modelle. Die erste Entscheidung einer strukturalistischen Rekonstruktion besteht in einer noch nicht formalen Charakterisierung der intendierten Modelle. Dafür kommen Menschen, Krankheitsfälle, Diagnosen, Untersuchungen, Symptome oder Verwandte Begriffe in Frage. Nach dem in dieser Arbeit vertretenen Verständnis von Ontologien zur Spezifikation eines Sprachgebrauchs sind die Modelle der ICD-10 sprachlicher Natur, und zwar in Form von Beschreibungen von Krankheit oder Todesursache samt ihrer Kodierung.

Was es gibt – potentielle Modelle: Durch potentielle Modelle der ICD werden die Teile und Verhältnisse von ICD-Anwendungen (schriftliche Diagnosen) rekonstruiert. Da potentielle Modelle über den gesamten Entwicklungsverlauf und über alle Varianten unveränderlich sind, müssen sie für jede der Varianten und Versionen adäquate Beschreibungen erlauben. Insbesondere ist zu entscheiden, welchen Stellenwert dem Kodierungssystem der ICD-10 eingeräumt wird. Während den Namen von Termin (IDs) im Zusammenhang

mit formalen Ontologien ein geringer Stellenwert zugeordnet wird, sind die in der ICD-10 vergebenen IDs für Kategorien essentiell. Sie sollen daher als Bestandteil jeder ICD-10-Anwendung in die Modellierung mit eingeschlossen werden. Ein Modell der ICD-10 ist somit die Klassifikation einer Krankheit (im Falle einer Diagnose) oder eine Beschreibung einer Todesursache (im Falle eines Totenscheins) in Text und Kodierung.

Definition 4.14. $x = \langle E, C, \dagger; T, X; S \rangle$ ist potentielles Modell des Theorieelementes *ICD-10* ($x \in M_p(ICD-10)$) gdw.

1. E ist eine äthiologische Beschreibung mit optionaler Organmanifestation.
2. C ist eine Menge von Komplikationen.
3. \dagger ist eine Doppelklassifikation in ICD-10 \dagger -Kodierung.
4. T ist Menge von Zeitintervallen, die Spezialform $[]$ stehe für ein unspezifiziertes Intervall.
5. X ist eine Menge von Indizes.
6. S ist eine Menge von Tupeln $\langle x, c, t \rangle$ wobei $x \in X$, $c \in C$, $t \in T$ zur Kodierung der Sequenz zur Beschreibung einer Todesursache.

Beispiel 4.6. Die Diagnose aus Beispiel 4.5 wird durch ein potentielles Modell (beziehungsweise eine intendierte Anwendung) x ,

$$x = \langle \text{Tuberculous meningitis}, \emptyset, A17.0\dagger G01^*, \emptyset, \emptyset \emptyset \rangle$$

repräsentiert.

Beispiel 4.7. Die ICD-10 gibt das folgende Beispiel der Kodierung einer Todesursache:

„1) Extensive haemorrhage *due to*

- a) Extensive haemorrhage *due to*
- b) Traumatic amputation of right leg *due to*
- c) Run over by street car

The haemorrhage is a complication of the traumatic amputation, which, in its turn, is caused by the street car accident. Consequently, the sequence is extensive haemorrhage caused by traumatic amputation of the right leg caused by being run over by a street car.“ [World Health Organization, 2016, S. 33]

Das die Todesursache repräsentierende potentielle Modell (beziehungsweise die intendierte Anwendung) $x = \langle E, C, \dagger; T, X; S \rangle$ mit

$$\begin{aligned}
 E &= \emptyset \\
 C &= \{ \text{„Extensive haemorrhage“, „Traumatic amputation of right leg“, } \\
 &\quad \text{„Run over by street car“} \} \\
 \dagger &= \emptyset \\
 T &= \{ \square \} \\
 X &= \{ 1a, 1b, 1c \} \\
 S &= \{ \langle 1a, \text{„Extensive haemorrhage“, } \square \rangle, \langle 1b, \text{„Traumatic amputation of right leg“, } \square \rangle, \\
 &\quad \langle 1c, \text{„Run over by street car“, } \square \rangle \}
 \end{aligned}$$

repräsentiert.

Wie es ist – Aktuelle Modelle: Während potentielle Modelle für beliebige Kombinationen aus ätiologischen Beschreibungen und Klassifikationen stehen, werden die Kombinationsmöglichkeiten für aktuelle Modelle eingeschränkt:

Definition 4.15. $x = \langle E, C, \dagger; T, X; S \rangle$ ist aktuelles Modell des Theorieelementes *ICD-10* ($x \in M(ICD-10)$) gdw.

1. x ist potentielles Modell, $x \in M_p(ICD-10)$.
2. E und \dagger stehen in einem im Katalog [World Health Organization, 2016] aufgezählten Verhältnisse.

Wie es tatsächlich ist – Intendierte Anwendungen: Prinzipiell läßt sich die ICD-10 sowohl normativ als auch deskriptiv verstehen. Mit dem deskriptiven Verständnis geht die intendierte Behauptung einher, daß jede Klassifikation x eines Krankheits- oder Todesfalls stets einer Klassen der ICD-10 entspricht ($I(ICD-10) \subseteq M(ICD-10)$). Im normativen Verständnis, das als statistisches Werkzeug vor allem Vergleichbarkeit ermöglichen soll, sind neben den ICD-10-eigenen Klassifikationen prinzipiell keine anderen denkbar. Die intendierten Anwendungen erschöpfen sich dann in der ICD-10 eigenen Aufzählung von Kategorien. Rekonstruiert als Theorie, besitzt die ICD-10 dann keine prognostische Behauptung ($I = I_0$). Da weiterhin bereits alle intendierten Anwendungen verifiziert sind, ist die *ICD-10* – wenn normativ verstanden – nicht empirisch falsifizierbar und nur in sehr schwachen Sinn eine empirische Theorie.

Theoriegeladenheit und potentiell partielle Modelle: Da die Bestimmung (Messung) einer \dagger^* -Kodierung nur unter Rückgriff auf die ICD-10 möglich ist, ist die \dagger^* -Klassifikation ein theoriegeladener Begriff. Übereinstimmungen zwischen \dagger^* -Kodierung und Ätiologie tragen somit nicht zur Bestätigung der ICD-10 bei, sondern sind Zeichen ihrer sachgerechten Anwendung. Die \dagger^* -Klassifikation muß daher vom empirischen Gehalt ausgeschlossen werden:

Definition 4.16. $x = \langle E, C; T, X; S \rangle$ ist partiell potentielles Modell des Theorieelementes *ICD-10* ($x \in M_{pp}(ICD-10)$) gdw. ein \dagger existiert, so daß $y = \langle E, C, \dagger; T, X; S \rangle$ ein potentielles Modell ist ($y \in M_p(ICD-10)$).

Historische Perioden: Als historische Perioden zur Rekonstruktion der zeitlichen Entwicklung der ICD-10 eignen sich die Zeiträume zwischen der Herausgabe einer neuen Hauptversionen bis zu ihrer Nachhauptversion. Damit ergeben sich zehn historische Periode mit ihren Geltungsbereichen: h_1 : 1893-1900, h_2 : 1900-1910, h_3 : 1910-1920, h_4 : 1920-1938, h_5 : 1938-1946, h_6 : 1946-1955, h_7 : 1955-1965, h_8 : 1965-1975, h_9 : 1975-1992, h_{10} : 1992-heute. Alle Entwicklungen innerhalb einer historischen Periode – beispielsweise die regelmäßigen Veröffentlichungen von Updates und die Verabschiedungen national oder funktional angepaßten Varianten – wird nicht zeitlich rekonstruiert, sondern durch eine Spezialisierungsrelation innerhalb eines Theorienetzes pro historischer Periode.

Das Theorienetz der ICD-10: Innerhalb der zehnten historischen Periode der ICD-Entwicklung sind eine Reihe von Varianten der Basis *ICD-10-WHO* verabschiedet worden: Die ICD-10-GM (*German Modification*) ist eine an das deutsche Gesundheitswesen angepaßte Variante. Sie ist eine Erweiterung der ICD-10-SGB-V 1.3. Letztere wurde als Minimalstandard der ICD-10-WHO zum alleinigen Zweck der Abrechnung eingeführt. Beide werden im Auftrag des Bundesministeriums für Gesundheit vom Deutschen Institut für Medizinische Dokumentation und Information herausgegeben. Die ICD-10-GM ist gegenüber der ICD-10-WHO um eine Kodierung für ambulante Diagnosen erweitert [Schopen, 2002]. In den USA werden vom *Department of Health and Human Services* (HHS) zwei ICD-10-WHO-Varianten zur verbindlichen Verwendung verabschiedet: Die ICD-10-CM ist eine um genauere Diagnosecodes, die ICD-10-PCS, eine um Vorgehensweisen erweiterte Version. Da ICD-10-CM und ICD-10-PCS unterschiedliche Kapitel der ICD-10-WHO erweitern – sich die jeweiligen Spezialisierung der ICD-10-WHO also nicht ausschließen [ICD-10 Transition Workgroup, 2003] – können beide als *ein* Theorieelement rekonstruiert werden. Neben dieser kleinsten Auswahl existieren für Spezialbereiche sowie für nationale Bedürfnisse eine Vielzahl weiterer ICD-10-Varianten. Die Spezialisierung zwischen den verschiedenen Versionen betrifft deren Konzeption und zieht keine Übertragbarkeit von Klassifizierungen entlang Spezialisierungspfaden nach sich. Für die Übertragung konkreter Kodierungen zwischen Varianten werden vom jeweiligen Herausgeber Übersetzungstabellen zur Verfügung gestellt.

Die Theorieevolution der ICD: Um das Netz der ICD-10 innerhalb einer Theorieevolution zu verorten, muß sich jedes Theorieelement des ICD-10-Theorienetzes als Spezialisierung eines Theorieelementes des vorausgehenden Netzes darstellen lassen. Als historische Vorgängerperiode der ICD-10 sei gelte die Zeit der Nutzung der ICD-9. In Fortführung dieses Schemas wird die ICD- x als x te historische Periode rekonstruiert. Das kombinierte Theorieelement der ICD-10-GM und ICD-10-PCS ist eine diachronische Spezialisierung des ICD-9-CM [ICD-10 Transition Workgroup, 2003]. Das ICD-10-GM das eine Erweiterung des ICD-10-WHO ist, ist ebenso wie das ICD-10-WHO eine diachronische Spezialisierung des ICD-9-WHO. Das Theorieelement ICD-10-SGB-V das als

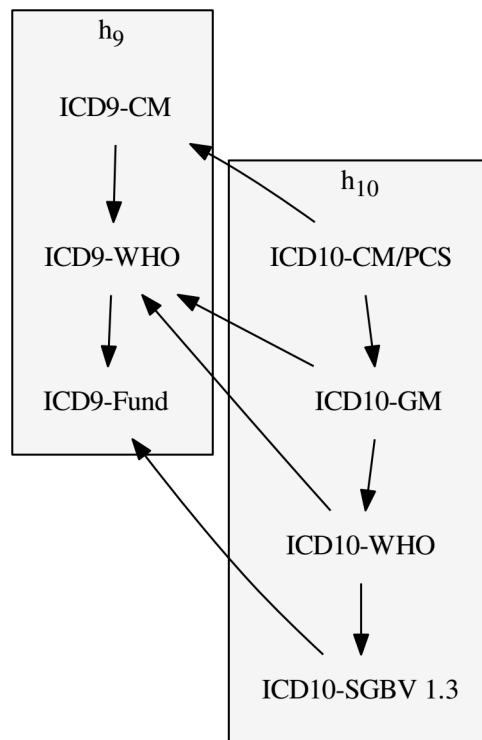


Abbildung 4.8: Ausschnitt der rekonstruierten Theorievolution der ICD.

Minimalvariante der ICD-10-WHO entwickelt wurde, besitzt keinen expliziten Vorgänger innerhalb der neunten historischen Periode. Soll die Entwicklung der ICD evolutionär verstanden werden, muß daher zumindest nachgewiesen werden, daß das Commitment der ICD-10-SGB-V 1.3 in der neunten historischen Periode bereits geteilt wurde. Das minimale Commitment eines Theorienetzes wird in der "Run over by street car" strukturalistischen Rekonstruktion üblicher Weise als Fundamentelement explizit gemacht. Ein Theorieelement T ist fundamental für ein Theorienetz N , wenn alle Theorieelemente T' des Netzes N , Spezialisierungen von T sind. Das minimale Commitment der neunten historischen Periode soll als Theorieelement ICD-9-Fund rekonstruiert werden. Eine graphische Darstellung des hier skizzierten Ausschnittes der ICD-Entwicklung gibt Abbildung 4.8.

4.5 Strukturalistische Analyse von Techniken zur Entwicklung formaler Ontogien

4.5.1 Ontology Evolution

Im Schema der Theorieevolution nach Kuhn geht jeder Änderung einer Theorie die Entdeckung einer Anomalie voraus. Im Sinne einer Ontologie entspricht das einer inzwischen als ungewollt ausgewiesenen terminologischen Implikation oder einer ungewollten Klassifizierung einer Instanz. Direkt übertragen läßt sich auch Kuhns Aussage, daß man der Assimilation eines neuen Faktums nicht durch ein einfaches mechanisches Hinzufügen zur Theorie gerecht wird, sondern auch eine neue Sicht auf die Welt nötig ist Kuhn [1993,

S. 66]. Die Anpassung einer Spezifikation muß im Zusammenhang mit einer angepaßten Konzeptionalisierung stehen. Wird eine Ontologie als Spezifikation eines Sprachgebrauchs verstanden, entstehen Anomalien als nichtableitbare Sätze aus der Spezifikation eines Sprachgebrauchs.

Die mit Methodiken zur Unterstützung von *ontology change* zusammenhängende Vorstellung, Wissenschaftstheorie könne (überhaupt) einen positiven Einfluß auf die inhaltlichen Fortschritte eines Wissenschaftsbetrieb ausüben, trifft eine Kontroverse innerhalb der Wissenschaftstheorie [Gesang, 2005] und trifft unter Fachwissenschaftlern traditionell auf wenig Zustimmung. Noch stärker argumentiert Feyerabend [1986], daß jeder methodische Zwang durch eine normative Wissenschaftstheorie ein Hemmnis für eine produktive Wissenschaft darstellt. Selbst in der Rekonstruktion hält Popper das notwendig neue Element zur Reaktion auf eine Anomalie für nicht erklärlich [Popper, 1994]. Einstein [1953, S. 168] teilt diese Einstellung:

„Höchste Aufgabe des Physikers ist also das Aufsuchen jener allgemeinsten [...] Gesetze, aus denen durch reine Deduktion das Weltbild zu gewinnen ist. Zu diesen [...] Gesetzen führt kein logischer Weg, sondern nur die auf Einfühlung in die Erfahrung sich stützende Intuition. „

Die strukturalistische Reaktion auf diese Bedenken orientiert sich an Kuhn, wonach sich wenigstens die Gründe des Festhaltens oder der Ablehnung eines Paradigmas rekonstruieren lassen [Kuhn, 1993]. Eine Theorie (eine Sequenz von Theorienetzen) entwickelt sich evolutionär (ist eine Theorieevolution E), wenn sie über alle historischen Perioden hinweg von einer wissenschaftlichen Gemeinschaft SC getragen wird. Im wesentlichen müssen dafür drei Eigenschaften erfüllt sein. 1) Das Commitment der Wissenschaftlichen Gemeinschaft auf eine (unveränderliche) Konzeptionalisierung M_p . 2) Während jeder historischen Periode h_i intendieren Mitglieder der jeweiligen Wissenschaftlergeneration die Anwendung der Theorie – das heißt des Theorienetzes N_i während der historischen Periode h_i – auf intendierte Anwendungen $I(T)$ einer Theorie T aus N_i . 3) Die Theorieelemente einer jeden historischen Periode sind – mit Ausnahme der ersten historischen Periode – diachronische Spezialisierung σ_d von Theorieelementen der direkt vorausgehenden Periode.

Seien O_1 und O_2 Ontologieversionen einer Ontologie, wobei die Ontologieversion O_2 aus O_1 in den vier Phasen der *ontology evolution* nach [Stojanovic u. a., 2002] hervorgegangen ist (siehe dessen Wiedergabe auf Seite 121). Die Rekonstruktion als Theorieevolution kann entlang dieser Phasen erfolgen. Sei M eine Abfolge von Modifikationen, durch die die Ontologie O_2 aus der Ontologie O_1 hervorgeht. Mögliche elementare Operatoren für die Modifikation von Ontologien schlagen Maedche u. a. [2002] vor, Stojanovic u. a. [2002] geben eine Menge zusammengesetzter Operatoren an.

Schritt 1: Change Representation: Die erste Entscheidung einer strukturalistischen Rekonstruktion liegt in der Feststellung, ob die Ontologien O_1 und O_2 noch einer gemeinsamen historischen Periode angehören. Weniger schwere Veränderungen werden für eine klarere Darstellung in Regel innerhalb derselben historischen Periode rekonstruiert. Zwischen Theorieelementen T_1 und T_2 verschiedener historischen Perioden kann eine

Ablösung der dahinterstehenden Generationen $G(T_1)$ und $G(T_2)$ stattfinden, außerdem kann sich der intendierte Anwendungsbereich $I(T_1)$ zu $I(T_2)$ verschieben ($I(T_2) \not\subseteq I(T_1)$). Aus den üblich angegebenen Operatoren sind diese Kriterien jedoch nicht direkt ablesbar und müssen so aus anderen, nicht formalisierten Quellen einfließen. Sowohl innerhalb eines Theorienetzes, als auch über eine ganze Ontologieevolution hinweg, bleibt die Signatur (die potentiellen Modelle M_p der beinhalteten Theorieelemente) unverändert. Umfaßt die Folge von Änderungen M das Hinzufügen oder Löschen einer Klassen oder Rolle N , kann N entweder als unwesentlich von der Rekonstruktion in potentiellen Modellen M_p ausgeschlossen werden, oder wird in der retrospektiven Rekonstruktion von Anfang an mitgeführt. Der Verlauf des Hinzufügens oder Entfernens von atomaren Termini ist strukturalistisch prinzipiell nicht rekonstruierbar. Alle weiteren Operationen M zwischen O_1 und O_2 seien unterschieden in additive Operationen M^+ durch die zusätzliche Restriktionen eingebracht werden und subtraktive Operationen M^- durch die Restriktionen zurückgenommen werden. Die Ontologien die aus O_1 unter Anwendung der subtraktiven Modifikationen M^- entstehen, werden durch das Theorieelement T_0 rekonstruiert. Die Ontologien O_1 und O_2 seien durch Theorieelemente T_1 und T_2 rekonstruiert. In einem Theorienetz sind sowohl T_1 , als auch T_2 Spezialisierungen von T_0 . Im *non statement view*, werden T_1 und T_2 durch Teilmengen der Modelle von T_0 repräsentiert. Indem das aus T_1 und T_2 verallgemeinerte Theorieelement T_0 innerhalb der historischen Periode von T_1 rekonstruiert wird, ist sichergestellt, daß sich T_2 bzw. alle in die Theorieevolution involvierten Theorieelemente in Pfaden der Spezialisierung in die erste historische Periode zurückführen lassen.

Schritt 2: Semantics of Change: Jede Modifikation in M zieht eine Verschiebung von in O_2 definierten atomaren Termen gegenüber O_1 nach sich, wobei sowohl Spezifikationen verschärft, als auch gelockert werden können. In der strukturalistischen Rekonstruktion in der Theorieelemente T_1 und T_2 zu einem verallgemeinerten Theorieelement T_0 ins Verhältnis gesetzt werden, stellt sich jede Modifikation als zusätzliche Restriktion bezüglich T_0 dar. Erscheint für einen Anwendungsfall von O_1 nicht jede Änderung in M angemessen, wird von dessen Anwender womöglich nur eine Teilmenge $M' \subseteq M$ der Änderungen in M getragen. Für jede Ontologie O' die sich aus O_1 unter Anwendung der Modifikationen M' ergibt, gilt: Das Theorieelement T' als Rekonstruktion von O' , ist eine Spezialisierung von T_0 . Weiter gilt: Ist $M' \subseteq M^+$, so ist $T_2 \sigma T'$ und analog, falls $M' \subseteq M^-$, ist $T_1 \sigma T'$. Umfaßt M' sowohl additive Modifikationen aus M^+ , als auch subtraktive aus M^- , so steht T' weder mit T_1 , noch mit T_2 in einem Spezialisierungsverhältnis.

Schritt 3: Change Implementation Die Implementierung eines Änderungswunsches M kann als Entscheidung für ein $M'' \subseteq M$ verstanden werden. Die strukturalistische Rekonstruktion von M'' erfolgt als Theorieelement T_3 . Sollten sich der Übergang von einer Ontologie O_1 auf O_2 in verschiedene zusammengehörige Commitments unterteilen, kann es sinnvoll sein, diese als explizit Teilmengen von M und damit in Form weiterer Theorieelementen explizit zu machen. Eine graphische Darstellung des entstehenden Netzes findet sich in Abbildung 4.9.

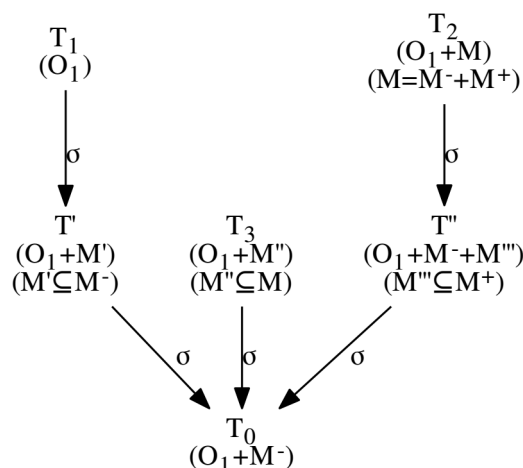


Abbildung 4.9: Der Übergang von einer Ontologieversion O_1 durch Modifikationen M zu $O_2 = O_1 + M$, rekonstruiert als Theorienetz aus Theorieelementen T_i . M^+ stehe für additive Änderungen, M^- stehe für Revisionen, $O + M$ stehe für die Anwendung der Modifikationen M an der Ontologieversion O .

Schritt 4: Change Propagation Die zu propagierenden Änderungen an der Ontologie O_1 hin zu O_2 werden in strukturalistischer Rekonstruktion durch ein ganzes Netz von Ontologien rekonstruiert. Dank des Verständnisses der Theorieevolution in Teilschritten aus ganzen Netzen je historischer Periode, sind für Anwender der Ontologie O_1 zwei Szenarien der Reaktion möglich. Erweist sich keines der neuen durch das Theorienetzes propagierten Theorieelemente als vorteilhaft, kann das Commitment zur bisherigen Ontologie O_1 , also dem weiter vorhandenen Theorieelement T_1 , einfach fortgeführt werden. Beinhaltet die Modifikation in Form eines propagierten Theorieelementes T_3 ein Commitment, das gemäß der je eigenen Anwendung $I(T_1)$ bisher nur implizit vorlag, kann die Bindung an das neue Theorieelement T_3 geknüpft werden, ohne daß dafür eine Migration von Daten oder Anwendungsschemata notwendig ist. In beiden Fällen kann eine aufwendige Migration eigener Daten in Folge einer weiterentwickelten Ontologie vermieden werden. In der diachronischen Rekonstruktion brauchen schließlich nur diejenigen Theorieelemente geführt werden, die tatsächlich von Mitgliedern der aktuellen Generation angewendet werden, oder die als Ausgangspunkt weiterer Spezialisierung dienen.

Verschiedene Anwender einer Ontologie verfolgen zum großen Teil gemeinsame Interessen, die sich in der Zugehörigkeit zu einer Community sowie eines gemeinsam akzeptierten konzeptionellen Kerns äußern. Andererseits herrschen im Speziellen stets divergierende Annahmen bezüglich der Konzeptionalisierung sowie unterschiedliche Einstellungen bezüglich einer konservativen versus einer änderungsfreudigen Updatepolitik. Die diachronische Repräsentation einer Ontologie durch Theorienetze wird diesen widerstrebenden Interessen zugleich gerecht. Außerdem wird die Rekonstruktion von Änderungen als monotone Ausdifferenzierung innerhalb eines einheitlichen Vokabulars der einheitsstiftenden Funktion einer Ontologie innerhalb einer Community gerecht. Während innerhalb eines Theorienetzes die Darstellung der Vorgänger- und Nachfolgerschaft von Ontologien zugunsten monotonen Spezialisierung (Hinzunahme von Restriktionen) aufgegeben

wird, erlaubt die Betrachtung von Theorienetzen über historische Perioden hinweg, die Rekonstruktion des Entwicklungsverlaufes einer Ontologie.

4.5.2 Ontology Versioning

Ontologien als genidentische Entitäten

Für den (diachronischen) Strukturalisten gelten Theorien als *genidentische Entitäten*, d.h., daß sich die verschiedenen Entwicklungsstadien einer Theorie jeweils unterscheiden, letztere jedoch ganzheitlich in ihrem gesamten Entwicklungsprozess aufgefaßt wird. Eine Theorie *ist* damit ihre Entwicklungsgeschichte. Einer solchen Auffassung kommt das *ontology versioning* sehr nahe. Anstatt eine weiterentwickelte Ontologie – die im Allgemeinen zunächst inkompatibel zu ihrem Vorgänger ist – als zweite Ontologie anzusehen, werden beide als dieselbe Ontologie in unterschiedlicher Version aufgefaßt. Was zunächst nur eine prinzipielle bzw. philosophische Auffassung ist, soll im *ontology versioning* auch technisch ermöglicht werden. So soll der Anwender einer Ontologie (sowohl in Form von TBoxen als auch für ABoxen) möglichst von den Details der Evolvierung freigehalten werden und Ontologien möglichst als genidentische Entität anstatt in ihrer konkreten Version ansprechen können. In strukturalistischer Sprechweise hat ein *ontology versioning*-System die Aufgabe der Auflösung einer diachronisch verstandenen Ontologie in eine passende konkrete synchronische Ontologie.

Im *ontology versioning* geht es nicht um Kausalitäten oder die Aufdeckung von Gesetzmäßigkeiten hinter der Entwicklungsgeschichte, stattdessen sollen Ontologie historisch und als ein kulturelles Artefakt (siehe [Moulines, 1996]) verstanden werden. Besonders deutlich wird dies, wenn *ontology evolution* beschrieben wird als

„[...] a sequence of transformations and versions that expand, contract and revise the ontology; even after deployment. Furthermore, different engineers might want to contextualize the definition for their particular purpose, leading to a diverging range of subjective views (versions).“ [Leenheer u. a., 2006, S. 5]

Hier wird der strukturalistischen Auffassung in gleich drei wesentlichen Punkten entsprochen: 1) Es herrscht Einigkeit im Verständnis von *ontology evolution* als Sequenz, welche über die Zeit über in der Größe pulsierenden Ontologien spricht. 2) Weiterhin herrscht Übereinstimmung in der Auffassung der Sequenz von ganzen Netzen – nicht nur einer linear weiterentwickelten Ontologie.

„Intuitively, a theory-evolution is a *changing* theory-net. More intuitively still, a theory-evolution may be visualized as a ‚living‘ net growing and/or shrinking in different directions over historical time.“ [Balzer u. a., 1987, S. 205]

3) Schließlich wird konstatiert, daß verschiedene Versionen einer Ontologie bereits durch verschiedene subjektive Sichtweisen und wiederum verschiedene Einsatzzwecke bedingt sind. Subjekte in diesem Sinn sind die Anwender einer Ontologie (Wissenschaftler im Sinn einer Theorie). Daß sich Facetten als pragmatische Dimension dem Einfließen in die Modellierung einer Ontologieentwicklung empfehlen, findet in der strukturalistischen Theoriekonzeption Beachtung.

Rekonstruktion einer versionierten Ontologie

Sei \mathcal{O} eine genidentisch verstandene Ontologie die eine Menge M von Versionen O_i (Dateien) umfaßt. Sei weiterhin b (*backward-compatible-with*) eine zweistellige Relation über Ontologieversionen, so daß $b(O_i, O_j)$ gilt, gdw. die Version O_i abwärtskompatibel zur Version O_j deklariert wurde. Das Tupel $\langle M, b \rangle$ ist einen Graph. Für jede Ontologieversion sei weiterhin eine Entstehungszeit ausgezeichnet, so daß die Ontologieversionen in M linear geordnet sind. Gebräuchliche Formen zur Darstellung der Kompatibilitätsrelation sind ein zweistufiges Versionsschema (siehe [Brown und Runge, 2000]) oder spezifische Schlüsselwörter zu Auszeichnung von Kompatibilität (beispielsweise `backwardCompatibleWith` in OWL).

Die strukturalistische Rekonstruktion der gegebenen Struktur der Ontologie \mathcal{O} erfolgt als Ontologieevolution. Grundsätzlich werden dazu *major releases* der Ontologie \mathcal{O} durch historische Perioden rekonstruiert. *Minor releases* einer *major release* bzw. durch Abwärtskompatibilität zusammenhängende Ontologieversionen werden dabei durch Theorienetze rekonstruiert. Die Rekonstruktion von einzelnen Ontologieversionen erfolgt durch Theorieelemente. Eine Struktur aus Theorieelementen, Theorienetzen (historischer Perioden) heißt Theorieevolution, wenn im Kern zwei Bedingungen gelten: 1) Die Theorieelemente aller Theorienetze besitzen die selbe Menge potentieller Elemente. 2) Für alle Theorieelemente aus auf die erste historische Periode folgenden Perioden gilt, es gibt ein Theorieelement im vorausgehenden Theorienetz aus dem eine Spezialisierung erfolgt.

Rekonstruktion von Theorieelementen aus Ontologieversionen: Die Rekonstruktion von Theorieelementen $T = \langle M_p, M, M_{pp}, C, L, I, G \rangle$ erfolgt in der in Kapitel 2 vorgestellten Methodik, mit zwei Unterschieden:

1) In der strukturalistischen Auffassung ist die Menge M_p potentieller Elemente ein unveränderliches Wesensmerkmal einer Theorieevolution und wird von allen involvierten Theorieelementen geteilt. Da sich die Signatur von Ontologien selbst bei als kompatibel ausgezeichneten Nachfolgeontologien ändern kann (im Zuge einer Erweiterung, siehe Abschnitt 3.3.2), ist die Invarianz potentieller Modelle über alle Theorieelemente nur im Zuge einer global fokussierten Rekonstruktion möglich. Denkbar ist eine Konstruktion aus einer Obermenge aller je eingeführten Termnamen (N_C, N_R, N_I) . Eine Beschränkung auf die zum Verständnis der Evolvierung notwendigen Terme ist allerdings zweckmäßiger.

2) Die in der Rekonstruktion von Theorieevolution, verwendeten diachronischen Theorieelemente besitzen eine um wissenschaftliche Generationen G erweiterte Struktur. Die wissenschaftlichen Generationen sind über die Theorieelemente einer historischen Periode gleich.

Rekonstruktion von Theorienetzen aus abwärtskompatiblen Ontologieversionen: Innerhalb eines Theorienetzes werden die als zueinander kompatibel ausgezeichneten Versionen einer Ontologie rekonstruiert. Dabei ist die Kompatibilität zwischen Ontologieversionen ausdrücklich nicht im allgemeinen Sinn modelltheoretisch definiert, sondern lediglich im Rahmen der intendierten Modelle einer Ontologie [Patel-Schneider u. a., 2004]. Diese vage Formulierung läßt sich strukturalistisch als Gleichheit der Mengen intendierter Anwendungen $I(T_i)$ über alle Theorieelemente T_1, \dots, T_n eines Netze rekonstruieren.

Durch Modifikationen an einer Ontologieversion können aktuelle Modelle hinzugenommen oder ausgeschlossen werden, solange diese Änderungen nicht die Menge intendierter Anwendungen tangiert. Innerhalb eines Netzes werden Theorieelemente nicht bezüglich ihrer Entstehungsreihenfolge geordnet, sondern bezüglich Spezialisierung. Revisionen an einer Ontologieversion bedürfen daher unter Umständen einer Rekonstruktion mit einem additiven und einen subtraktiven Anteil.

Rekonstruktion von historischen Perioden als major releases: Ontologieversionen verschiedener *major releases* erheben nicht den Anspruch auf Kompatibilität. Diese Eigenschaft deckt sich mit der strukturalistischen Konzeption der Theorieevolution, in der von historischer Periode zu historischer Periode (bzw. Theorienetz zu Theorienetz) intendierte Anwendungen sowohl hinzugenommen als auch ausgeschlossen werden können. Die Stringenz einer Theorieevolution ergibt sich dagegen aus der Beschränkung der Übergänge zwischen Theorienetzen auf Übernahme oder Hinzunahme von Annahmen. Übertragen auf den *non statement view* sind die Übergänge zwischen Theorienetzen als Übernahme oder Verkleinerung von Modellmengen der beteiligten Theorieelemente gekennzeichnet.

4.5.3 Ontology Merging

ontology merging ist ein Prozess in dem auf Basis zweier (oder allgemein mehrerer) Eingabeontologien O_1 und O_2 , eine neue Ontologie O_3 erzeugt wird, so daß O_3 das konzeptionelle Wissen aus O_1 und O_2 umfaßt, und dabei möglichst kompakt ist (siehe Definition 4.13).

Ontology Merging als Theorieevolution

Da die Ontologie O_3 zeitlich nach O_1 und O_2 entsteht und in einem Ähnlichkeitsverhältnis zu beiden steht, liegt die Idee nahe, *ontology merging* als Muster einer Theorieevolution darzustellen. O_1 und O_2 liegen in dieser Betrachtungsweise in einer historischen Periode h_1 , während O_3 in der direkt auf h_1 folgenden Periode h_2 liegt. Für die Rekonstruktion als Theorieevolution müßte sich insbesondere zeigen lassen: 1) In ihrer Rekonstruktion als Theorieelemente besitzen die Ontologien O_1 , O_2 und O_3 die selben Signaturen. 2) Hinter O_1 , O_2 und O_3 steht immer dieselbe Community. 3) O_3 läßt sich als (diachronische) Spezialisierung sowohl von O_1 , als auch von O_2 darstellen.

Zu 1) Die Rekonstruktion von O_1 , O_2 und O_3 als Theorieelemente T_1 , T_2 und T_3 der selben Signatur $M_p(T_1) = M_p(T_2) = M_p(T_3)$ gestaltet sich schwierig, da sich die intendierten Anwendungsgebiete der Ontologien O_1 und O_2 nicht vollständig überdecken brauchen. Da O_1 und O_2 außerdem verschiedene Konzepte zur Abstraktion definieren können, müßten viele Konzepte in die Signatur der jeweils anderen Ontologie aufgenommen werden – nur um eine formale Angleichung der Signaturen von O_1 und O_2 zu erreichen. Zu 2) Die Ontologien O_1 und O_2 dürften ihre Existenz in der Regel unterschiedlicher Urheber-Communities verdanken. Ebenso dürfte sich mit der Entstehung der Ontologie O_3 eine neue Community bilden. Die Communities von O_1 , O_2 und O_3 als eine Community zu rekonstruieren, ist formal zwar möglich, dürfte den Rahmen an Freiheit in der

Rekonstruktion durch Theorieelemente aber überdehnen. Zu 3) Die Rekonstruktion von O_3 als Spezialisierung von O_1 und O_2 zieht nach sich, daß O_3 nur Modelle von O_1 besitzt, und nur Modelle von O_2 besitzt. Beruhen O_1 und O_2 allerdings auf verschiedenen Grundannahmen ist nicht auszuschließen, daß sich O_3 nicht als Vereinigung der Annahmen von O_1 und O_2 darstellen läßt.

Es zeichnet sich somit ab, daß *ontology merging* nur schwer als Theorieevolution rekonstruiert werden kann.

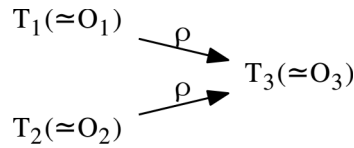
Ontology Merging als Theoriereduktion

Neben der Forderung nach minimalem Commitment, muß die Ontologie O_3 das konzeptionelle Wissen aus O_1 und O_2 umfassen. Dabei hat sich der Versuch des vorangehenden Abschnittes, das in Ontologien beinhaltete terminologische Wissen relativ zu einer Signatur (im wesentlichen ihre atomare Terme) zu rekonstruieren, als nicht zielführend ergeben. Alternativ läßt sich das in Ontologien spezifizierte Wissen ins Verhältnis zu setzen, indem deren Anwendungsstärke betrachtet wird. Das Wissen in einer Ontologie äußert sich in dieser Sichtweise als Potential zur Entscheidung, wann eine Anwendung, bzw. Daten bzw. Modelle zu einer Ontologie passen. Umfaßt die Ontologie O_3 alles Wissen der Ontologie O_2 (oder O_1), läßt sich die Frage, ob eine Interpretation \mathcal{I} Modell der Ontologie O_2 ist ($\mathcal{I} \models O_2$), übersetzen in eine Frage danach, ob eine entsprechende (andere) Interpretation \mathcal{I}' Modell von O_3 ist ($\mathcal{I}' \models O_3$). Die Entscheidung bezüglich O_3 kann dann in eine Entscheidung für O_2 transferiert werden. Ist das Delegieren von Modell-sein-Anfragen von O_2 nach O_3 für alle Interpretationen möglich, heißt die Ontologie O_2 *reduzierbar* auf O_3 .

Satz 4.1. *Seien die Ontologien O_1 , O_2 und O_3 durch die Theorieelemente T_1 , T_2 und T_3 rekonstruiert. Das Theorieelement T_3 umfaßt das konzeptionelle Wissen von T_1 und T_2 genau dann wenn T_1 und T_2 auf T_3 reduzierbar sind.*

Im allgemeinen Fall halten sowohl Theoriereduktion als auch *ontology merging* offen, in welchem Zusammenhang die atomaren Terme der Ontologie O_3 mit den Termen der Ontologien O_1 und O_2 stehen. Genauso stellt eine Theoriereduktion im Allgemeinen keinen Zusammenhang zwischen den Größen des Theorieelementes T_3 mit den Größen der Theorieelemente T_1 und T_2 her. Praktisch heißt das, daß Wissensbestände auf Basis von O_1 und O_2 , also die darauf aufbauenden ABoxen samt ihren Individuen manuell in die Konzeption der Ontologie O_3 übersetzt werden müssen.

Um den Aufwand der Migration von Wissensbeständen in eine neue terminologische Basis geringzuhalten, erzeugen viele *ontology merging*-Prozeduren neben der neuen Zielontologie O_3 , Alignments A_{13} und A_{23} zwischen den Eingabe-Ontologien O_1 und O_2 der Ausgabe-Ontologie O_3 . Die durch Alignments hergestellten Korrespondenzen zwischen Eingabe- und Zielontologien erlauben die automatisierte Übersetzung von Wissensbeständen (siehe Abschnitt 3.3.3). Werden die Reduktionsverhältnisse zwischen den Eingangs- und Zieltheorieelementen um die Verhältnisse der Alignments erweitert, besteht zwischen T_1 und T_3 sowie zwischen T_2 und T_3 eine *ontologische Reduktion* (siehe Abbildung 150).

Abbildung 4.10: *Ontology merging* als Theoriereduktion ρ .

4.5.4 Ontology Learning

Eine *ontology learning*-Prozedur ist ein Verfahren bei dem aus einem Korpus von Textdokumenten eine Ontologie $\mathcal{O} = \langle N_C, N_R, N_I, AL_C, AL_R, I, R, A \rangle$ konstruiert wird. Der Ablauf einer *ontology learning*-Prozedur wie er in Abschnitt 4.3.1 nach [Wong u. a., 2012, S. 20:6f] in fünf Schritten wiedergegeben wird (Seite 117), lässt sich als komponentenweise voranschreitende Spezifikation eines Theorieelementes T bzw. eines Theorienetzes N beschreiben. Die Eingabe für eine *ontology learning*-Prozedur ist ein Korpus von Dokumenten. Dem eigentlichen Prozess des *ontology learnings* geht damit ein Auswahlprozess von Dokumenten voraus.

Schritt 0: Auswahlprozess eines Textkorpus Der Sprachgebrauch, der durch die zu lernende Ontologie spezifiziert wird, erschöpft sich nicht in den Dokumenten eines ausgewiesenen Korpus. Dennoch sollte dieser so gewählt sein, daß er als repräsentativ gelten kann. Dazu sollten die ausgewählten Dokumente den Raum der durch sie repräsentierten Dokumente möglichst bereits aufspannen. Werden Ontologien als Spezifikation eines Sprachgebrauchs aufgefaßt, sind die intendierten Anwendungen Dokumente im Sinne von Modellen des zu spezifizierenden Sprachgebrauchs. Während Texte in einer *ontology learning*-Prozedur lediglich Eingabe dienen, sind sie bei der strukturalistischen Rekonstruktion Teil eines Theorieelementes. In strukturalistischer Rekonstruktion entspricht die Auswahl eines repräsentativen Korpus der Menge paradigmatischer Beispiele I_0 , während I die (offene) Menge des von I_0 aufgespannten Anwendungsbereichs der Ontologie \mathcal{O} umfaßt. Resultat der Textauswahl aus einem Anwendungsbereich ist damit ein nur in den intendierten Anwendungen bestimmtes Theorieelement T :

$$\begin{aligned}
 T &= \langle \cdot, \cdot, \cdot, \cdot, \cdot, I \rangle \\
 I_0 &\subseteq I
 \end{aligned}$$

Schritte 1 und 2: Extraktion von linguistischen Termen: Im ersten Schritt einer *ontology learning* Prozedur werden aus dem Textkorpus substantivische linguistische Terme extrahiert. Diese gehen im zweiten Schritt als Klassennamen N_C in die Ontologie \mathcal{O} ein. In der strukturalistischen Rekonstruktion gehen Klassennamen N_C als Basismengen D_1, \dots, D_i potentieller Modelle von T ein.

Mit der grundlegenden Konzeptionalisierung von potentiellen Modellen, läßt sich außerdem die Menge I intendierter Anwendungen im Sinne eines Sprache/Modell-Dualismus auch als Modellmenge begreifen. Das Resultat nach der Termextraktion ist ein Theorieelement mit partiell bestimmten potentiellen Modellen sowie intendierten Anwendungen:

$$\begin{aligned} T &= \langle M_p(T), \cdot, \cdot, \cdot, I(T) \rangle \\ M_p(T) &= \{ \langle D_1, \dots, D_i; \cdot \rangle \} \end{aligned}$$

Schritt 3: Extraktion terminologischer Klassenverhältnisse: Die Extraktion der Klassenverhältnisse der Ontologie O aus dem Textkorpus bestimmt die Verhältnisse innerhalb der Termeinführungen I der Ontologie \mathcal{O} . Gemäß der strukturalistischen Rekonstruktion einer Ontologie in Kapitel 2 werden Termeinführungen an zwei Positionen eines Theorieelementes strukturalistisch rekonstruiert: Zum einen zur Bestimmung der Struktur potentieller Modelle – d.h. der Basismengen sowie den darüber definierten Relationenzum anderen zur Eingrenzung möglicher Verhältnisse zwischen Relationen und Basismengen in Form aktueller Modelle M . Da im ersten Schritt alle Konzepte als Domänen D_1, \dots, D_i ohne eine tiefergehende Typisierung ihrer Verhältnisse bereits eingeführt wurden, werden die Klassenverhältnisse in I als aktuelle Modelle $M(T)$ rekonstruiert. Für alle Terme L und N in einem Verhältnis $L \sqsubseteq N$ gilt bei Rekonstruktion von L durch eine Basismenge D_l und N durch eine Basismenge D_n :

$$\begin{aligned} T &= \langle M_p(T), \cdot, M(T), \cdot, \cdot, I(T) \rangle \\ \bigwedge_{m \in M(T)} D_l &\subseteq D_n \end{aligned}$$

Schritt 4: Extraktion von Rollen: In einer Ontologie werden Rollen in der Regel in Form von Termeinführungen I deklariert. Rollen N_R gehen in der strukturalistischen Rekonstruktion durch T als die Relationen R_1, \dots, R_k potentieller Modelle $M_p(T)$ ein. Da zum Zeitpunkt der Extraktion von Rollen N_R noch nicht bekannt ist, über welchen der Basismengen D_1, \dots, D_i die jeweiligen Relationen R_1, \dots, R_k bestehen, werden alle Relationen R_1, \dots, R_k zunächst als Leittermenge $D_1 \times \dots \times D_i$ über allen Basismengen definiert.

$$\begin{aligned} M_p(T) &= \{ \langle D_1, \dots, D_i; R_1, \dots, R_k \rangle \} \\ \bigwedge_{1 \leq l \leq k} R_l &\subseteq D_1 \times \dots \times D_i \end{aligned}$$

Schritt 5: Entdeckung von Axiomen: Die Axiome – bzw. in Abgrenzung zu Termeinführungen – Restriktionen R die aus dem Textkorpus gewonnen werden, gehen als weitere Eingrenzung der aktuellen Modelle $M(T)$ des Theorieelementes T ein.

$$T = \langle M_p(T), \cdot, M(T), \cdot, \cdot, I(T) \rangle$$

Solange keine Verknüpfungen zu anderen Ontologien vorliegen, bleibt der Link mit $L(T) = M_p(T)$ neutral (ohne Auswirkung) bezüglich dem Gehalt der beteiligten Theorieelemente. Ohne Artefakte durch die Notation bleiben die partiell potentiellen Modelle mit $M_{pp}(T) = M_p(T)$ neutral, ohne modellinvarianten Domänen bleiben die Constraints mit $C = \mathbf{P}M_p$

neutral.

Zusatz-Schritt : Evaluation gelernter Ontologien: Die Trainingsmenge von Dokumenten zum Lernen einer Ontologie O ist Teil der Rekonstruktion als Theoricelement T in Form der Menge paradigmatischer Anwendungen $I_0(T)$ relativ zu einer Extraktion von Termen N_C und N_R . Ebenfalls relativ zu den extrahierten Termen wird eine gelernte Ontologie O als Menge aktueller Modelle $M(T)$ rekonstruiert. Die Evaluation (Präzisionsbewertung) einer Ontologie sollte bezüglich der Trainingsmenge korrekt ausfallen: $I_0(T) \subseteq M(T)$. Außerdem sollte die Ontologie auch den Anwendungsbereich jenseits der Trainingsbeispiele abdecken, also nicht überangepaßt sein: $I_0(T) \neq M(T)$. Die Modelle $I(T)$, $I(T) \supseteq I_0(T)$ die zusätzlich zur Evaluation der Ontologie O herangezogen werden, sollten – relativ zu den extrahierten Termen – ebenfalls von O abgedeckt werden: $I_0(T) \subseteq I(T) \subseteq M(T)$. Als Quelle weiterer intendierter Anwendungen zur Evaluation einer Ontologie können zum einen die aktuellen Modelle einer Referenzontologie O' dienen, so daß – falls T' die Rekonstruktion von O' ist – gilt: $I_0(T) \subseteq M(T') \subseteq M(T)$. Als weitere Quelle von Anwendungen zum Evaluieren der Ontologie O eignet sich ein erweiterter Korpus $I(T)$ von Dokumenten.

Unter der Voraussetzung derselben Signaturen von O und O' läßt sich der Zusammenhang der Evaluation auch als Theorienetz $N = \langle \{T, T'\}, \sigma \rangle$ rekonstruieren, wobei T' eine Spezialisierung von T ist:

$$T' \sigma T.$$

Die hier entwickelte strukturalistische Rekonstruktion eines Ontology-Learning-Prozesses durch Verfeinerung von partiellen Theoriestrukturen ähnelt in vielen Aspekten den Entwicklungsmustern wissenschaftlicher Übergänge bei [Balzer, 1997]. Ausgehend von einer *Entstehungsphase* aus lediglich durch Daten bestimmten Theorien, werden in einer Phase der *Hypothesengewinnen* die Modelle der Theorie spezifiziert, welche schließlich in einer Phase der *Passung* evaluiert werden. Unter den komplexen von Balzer beschriebenen Entwicklungsmustern, kommt das *ontology learning* der Methode des *Maschinellen Entdeckens* am nächsten.

4.6 Fazit

Es konnte gezeigt werden, daß sich die Evolvierung konzeptionellen Wissens als *pragmatische Theorieevolvierung* rekonstruieren läßt. Während die Entwicklung formaler Ontologien in Konzepten von Nachfolgeschafft sowie zugesicherter oder verneinter Kompatibilität verstanden wird, umfaßt eine strukturalistische Rekonstruktion eine Anschauung in historischen Perioden, über die eine diachronische Spezialisierung fortschreitet.

Umgekehrt ließen sich Bestandteile der strukturalistischen, evolutionären Erklärung von Theorieentwicklung zur Interpretation weiterer (nicht formalisierter Aspekte) der Ontologieentwicklung einsetzen. Mit den intendierten Anwendungen ist die Auszeichnung eines vorgesehenen Anwendungsgebietes einer Ontologie möglich. Mit der diachronischen Spezialisierung können die intendierten Anwendungen und der Gehalt einer Theorie (einer

Ontologie) zwischen einzelnen Entwicklungsschritten einer Theorie (einer Ontologie) ins Verhältnis gesetzt werden. Im Zusammenspiel aus potentiellen Modellen (Signatur der Ontologie), aktuellen Modellen (Axiome der Ontologie) und intendierten Anwendungen (Anwendungsbereich einer Ontologie) lassen sich Momente von Dauer und Wandel (von Kompatibilität und Inkompatibilität) von Forschung (von Ontologieentwicklung) erfassen.

Mit den Konzepten der Scientific Community, Generationen und Intendierten Anwendungen ließ sich ein Grounding für den Entwicklungsverlauf formaler Ontologien angeben. Danach ist ein evolutionärer Entwicklungsschritt die Ablösung einer Generation einer Community durch eine nachfolgende, sowie der Übergang eines Netzes aus ontologischen Commitments auf ein nachfolgendes. Eine Community läßt sich als Menge von Mitgliedern auszeichnen, die eine Variante des Commitment-Netzes auf einen ausgewiesenen Anwendungsbereich anwenden. Alle ihre Mitglieder tragen wesentliche Commitments der ersten Generation, also den Mitgliedern der ersten historischen Theorieperiode (Signatur sowie wesentliche terminologische Verhältnisse).

Mit der Interpretation formaler Ontologien als Theorienetz konnte das Problem der terminologischen Revision, insbesondere im Zusammenhang mit *ontology versioning*, *ontology merging*, *ontology evolution* und *ontology learning* auf die weniger problematische monotone Erweiterung projiziert werden. Die wesentliche Schwierigkeit in der algorithmischen Lösung der genannten Problemstellungen besteht in der Wahrung von Kompatibilität bei gleichzeitiger Umsetzung eines Änderungswunsches. Im Fall von *ontology versioning* ist das die Kompatibilität einer Ontologie zu einer Vorgängerversion, beim *ontology merging* die Kompatibilität zu mehreren Ausgangsontologien bei *ontology evolution* die Kompatibilität zu abhängigen Daten, sowie beim *ontology learning* die Kompatibilität zu einer Referenzontologie oder einen Korpus aus Daten oder Texten. Da die jeweiligen Konzepte von Kompatibilität nur vage bestimmt sind, bleibt auch eine Evaluation konkreter Implementierungen sowie bereits deren Spezifikation vage. In diesem Kapitel ist die Kompatibilität zwischen einer Ontologieversion zu ihrer Vorgängerversion als synchronische Spezialisierung einer fundamentalen Version dargestellt worden. Die Kompatibilität zwischen einer Ontologie und Daten ist als die empirische Behauptung einer Theorie spezifiziert worden. Die nicht-syntaktische aber konzeptionelle Kompatibilität einer Ontologie zu mehreren Vorgängerversionen wurde als nicht-ontologisches Reduktionsverhältnis charakterisiert. Die Kompatibilität zwischen einer Ontologie und einer Referenzontologie ist als Spezialisierung aus der Referenzontologie bei gleichbleibenden intendierten Anwendungen spezifiziert worden. Für die auf diese Weise strukturalistisch explizierten Verhältnisse liegen jeweils formale Definitionen vor.

Da eine automatisierte Ontologieentwicklung als normative Forschungsmethodik deutbar ist, sind bereits in der Zielstellung automatisierbarer terminologischer Erkenntnisgewinnung Zweifel berechtigt. Mit der Rekonstruktion als pragmatische Theorieevolution kann als alternative Zielstellung die Rationalität hinter der Entwicklung von ontologischen Commitments post-hoc aufgezeigt werden. Durch eine Abstraktion von Änderungen an Formalen Ontologien zu Gruppen zusammengehöriger Commitments wird Ontologieentwicklung zudem kompakt darstellbar. Durch die Rekonstruktion von terminologischen Änderungen mit *monotonen*, diachronischen Spezialisierungen erlangen die ursprünglich problematischen terminologischen Änderungen an einer Wissensbasis eine verständliche Deutung.

5 Zusammenfassung

In einer Gesellschaft, die von der Produktion und Verfügbarkeit großer Mengen an Wissen geprägt ist, kommt der Informatik als Wissenstechnik eine besondere Rolle zu. Die Künstliche Intelligenz ist mit ihrer Spezialisierung auf integrierte Assistenzsysteme zur Unterstützung von Menschen in Problemlösungsprozessen dabei von zentraler Bedeutung. Die Fokussierung auf wissensbasiertes Problemlösen brachte für die Repräsentation von Wissen innerhalb der Informatik eine Reduzierung auf zur Problemlösung notwendige Anteile, insbesondere unter Verzicht auf ‚Wahrheit‘ als eigentlich notwendige Bedingung für ‚Wissen‘ [Kalinski, 1989]. Die primär zum Zweck der maschinellen Problemlösung entstandenen Formalismen bilden inzwischen zwar eine Grundlage der Informationsgesellschaft (beispielsweise der vom W3C verabschiedete OWL-Standard [Bechhofer u. a., 2004]), werden den Ansprüchen an ‚wahres‘ Wissen aber nur partiell gerecht. Ohne die Möglichkeit zu dessen *Begründung* läßt sich im Hinblick auf nur zur Problemlösung repräsentiertes Wissen nicht von *objektivem* Wissen sprechen [Luft und Kötter, 1994]. Die Schwierigkeit der semantisch relevanten Repräsentation der Begründung von Wissen liegt im empirischen Charakter nicht-mathematischen Wissens.

Auf Seiten der Wissenschaftstheorie hat die mathematisch motivierte Konzeption exakten Wissens eine Erweiterung um Facetten erfahren, die für empirische Theorien notwendig sind [McKinsey und Suppes, 1953]. Die mathematische Struktur zur Explikation von Theorien wurde so um Konzepte von *Messung*, *Passung* von Daten und Theorie, *Theoriegeladenheit*, *Approximation* oder *intendierten Anwendungsgebieten* erweitert [Balzer u. a., 1987]. Mit der formalen Entwicklung eines *empirischen*, strukturalistischen Theoriebegriffs wurde zweierlei erreicht: Zum einen erlaubt er ‚deskriptiv‘ die Beschreibung der genannten Facetten und von Phänomenen wissenschaftlicher Erkenntnis in einer präzisen und selbst wahrheitsfähigen Form. Zum anderen gibt er ‚normativ‘ einen Rahmen zur Formulierung von Problemstellungen und Antworten vor, der einem Maßstab guter wissenschaftlichen Praxis entspricht.

In dieser Arbeit konnte die strukturalistische Konzeption wissenschaftlichen Wissens auf Formalismen und Anwendungen der Wissensrepräsentation und des Semantic Webs übertragen werden. Die Repräsentation von Wissen und deren Anwendungen wurde dafür in drei Bereiche unterschieden. a) *Lokales Wissen* umfaßt die kleinsten Strukturen, die eine empirische Überprüfung erlauben also empirisch wahrheitsfähig sind. b) *Verteiltes Wissen* umfaßt den Gehalt innerhalb der Verknüpfung lokalen Wissens. c) *Evolviertes Wissen* umfaßt die Änderungen lokalen oder verteilten Wissens über die Zeit.

Zu These 1) Die Logik-basierten Wissensrepräsentationsformalismen lassen sich innerhalb des strukturalistischen Theoriemodells interpretieren.

Es konnte gezeigt werden, daß sich Formalismen der Wissensrepräsentation strukturalistisch interpretieren lassen. a) Im Bereich lokalen Wissens konnte die Rekonstruierbarkeit

von Wissensbasen und deren einschlägigen Repräsentationsformalismen durch Theorieelemente demonstriert werden. b) Im Bereich verteilten Wissens konnten verschiedener Techniken und Funktionen (Import, Namensräume, Erweiterung) durch verschiedene Ausprägungen von Brückengesetzen rekonstruiert werden. Die Rekonstruktion verschiedener Semantiken von *ontology alignments* konnte deren unterschiedlichen Anwendungsbedingungen explizit machen. c) Im Bereich des Wissens über eine Entwicklung konnte die zentrale Problemstellung der Auszeichnung von Kompatibilität und Nachfolgebeziehung als Theorieevolution rekonstruiert werden.

Zu These 2) Das strukturalistische Framework deckt ein breiteres Spektrum an Wissensformen ab, als das der Wissensrepräsentation.

Die strukturalistischen Konzepte (Theorieelement, Brückengesetz, Theorieevolution u.a.) umfassen gegenüber den Konzepten der Wissensrepräsentation zusätzliche Facetten. Es konnte gezeigt werden, welche in der Wissensrepräsentation nicht repräsentierten Aspekte terminologischen Wissens den zusätzlichen strukturalistischen Konzeption entsprechen. a) Im Bereich lokalen Wissens konnten die intendierten Anwendungen eines Theorieelements als Deklaration des vorgesehenen Anwendungsbereichs einer formalen Ontologie rekonstruiert werden. Intendierte Anwendungen stellen die Rekonstruktion eines durch repräsentative Dokumente spezifizierten Sprachgebrauchs dar. b) Im Bereich verteilten Wissens konnten differenzierte Basismengen als ‚kategoriale‘ Konzepte einer formalen Ontologie rekonstruiert werden. c) Im Bereich sich entwickelnden Wissens konnte die Struktur eines Theorienetzes als Menge zeitlich invarianter Commitments in kompatiblen Versionen einer formalen Ontologie rekonstruiert werden.

Zu These 3) Mit wissenschaftstheoretischen Mitteln ist es möglich, ein empirisches ‚Grounding‘ für formal repräsentiertes Wissen zu spezifizieren.

Es konnte gezeigt werden, daß die Interpretation (die Modellierung) den zusätzlichen Facetten terminologischen Wissens ein Grounding formaler Ontologien und deren Anwendungen erlaubt. a) Im Bereich lokalen Wissens konnte mit dem in Ontologien spezifizierten Sprachgebrauch ein Grounding für formale Ontologien angegeben werden. Danach ist jedes Modell einer formalen Ontologie gleichzeitig ein Modell von lokalen Ontologien, die sich aus den repräsentativen Dokumenten des ausgezeichneten Sprachgebrauchs rekonstruieren lassen. b) Im Bereich verteilten Wissens konnten die Inklusionsbeziehungen zwischen den (kategorialen) Basismengen zweier formaler Ontologien als Grounding für Übersetzungen zwischen verschiedenen formalen Ontologien aufgezeigt werden. c) Im Bereich sich entwickelnden Wissens konnte das sich über jede Generation einer Community bis zu deren Ursprung zurückführbare und unveränderliche Ausgangscommitment als Grounding von terminologischer Revision dargestellt werden.

Zu These 4) Die im Strukturalismus formal darstellbare empirische Behauptung einer Theorie erlaubt die Spezifikation der Korrektheit komputationaler Verfahren in der Wissensverarbeitung.

Es konnte gezeigt werden, daß die Rekonstruktion der empirischen Behauptung einer Ontologie die Spezifikation der Korrektheit von Anwendungen der Ontologie erlaubt und zwar nicht nur relativ zur formalen Ontologie selbst, sondern bezüglich deren empirischer Basis. a) Im Bereich lokalen Wissens ist demonstriert worden, wie sich die Beantwortung von Anfragen nach Begriffssubsumtion und Klassenzugehörigkeit in einem Informations-

system nicht nur auf Basis einer Ontologie verifizieren, sondern bis auf ausgewiesene Sprachanwendungsfälle zurückführen läßt. b) Im Bereich verteilten Wissens ist die korrekte Beantwortung einer Anfrage an ein entferntes Informationssystem nicht nur bezüglich eines Alignments sondern auch bezüglich einer Menge unbedingt notwendiger ontologischer Grundannahmen definiert worden. c) Im Bereich sich entwickelnden Wissens konnte die Bestimmung einer kompatiblen Ontologieversion nicht nur auf Attribute zur expliziten Ausweisung von Kompatibilität zurückgeführt werden sondern auf ein die Entwicklung durchziehendes gemeinsames Commitment, ohne welches ein Sprechen von ‚Entwicklung‘ nicht sinnvoll wäre.

Zu These 5) Die Einbettung in das wissenschaftstheoretische Framework macht die Wissensrepräsentation durch traditionelle Erklärungsmuster der Wissenschaftstheorie erschließbar.

Es konnte gezeigt werden, daß sich Gegenstand, Methoden und Techniken der Wissensrepräsentation wissenschaftstheoretisch deuten lassen und sich damit die moderne Wissensrepräsentation einer philosophischen Tradition von Erklärung erschließt. a) Im Bereich lokalen Wissen konnten sich aus TBox und ABox zusammengesetzte Wissensbasen nicht nur als (terminologische) Theorien gedeutet werden, sondern als empirische Theorien samt theoretischer und empirischer Behauptung. b) Im Bereich verteilten Wissens konnten modulare Ontologien als Theorienetz sowie verteilte Informationssysteme als holistische Theorie gedeutet werden. Insbesondere die Deutung von Ontology Alignments als Theoriereduktion identifiziert einen zentralen Baustein des Semantic Webs mit einem zentralen Konzept der Wissenschaftstheorie. c) Im Bereich sich entwickelnden Wissens konnten verschiedene Workflows wie Ontology Evolution, Ontology Versioning, Ontology Merging und Ontology Learning auf Grundlage eines pragmatisch erweiterten Theoriebegriffs als Theorieevolution gedeutet werden. Auch dann, wenn die strukturalistische Rekonstruktion einer Ontologie nicht vorgesehen ist, können aus dem Erfolg dieser Arbeit Empfehlungen für die Konzeption terminologischen Wissens in der Informatik abgeleitet werden:

1. Eine Ontologie ist die Spezifikation des Sprachgebrauchs einer Community. Der Geltungsanspruch einer Ontologie ist die Formalisierung einer Auswahl von Konzeptverhältnissen gemäß der Verhältnisse innerhalb einer (offenen) Auswahl von Textdokumenten.
2. Der Zugriff auf Wissen verteilter Wissensbasen ist die Reduktion von Anfragen im Kontext einer Ontologie auf den Kontext einer anderen Ontologie. Im Zuge der Reduktion lassen sich die Anfragen und gesuchten Antworten der reduzierten Wissensbasis auf Anfragen und Antworten der reduzierenden Wissensbasis übersetzen.
3. Versionen und Varianten einer Ontologie bilden ein Netz einer monoton zunehmenden Ausdifferenzierung von Annahmen. Für baumartige Netze repräsentiert die Wurzel ein minimales Commitment, durch das Kompatibilität über terminologische Revision hinweg gewahrt bleibt.

Der überwiegende Teil der im Sprechen von einer Informationsgesellschaft adressierten Information ist empirischer Natur. Empirische Information läßt sich nicht allein aus formalen Axiomen ableiten oder falsifizieren, sondern besitzt Anteile wirklicher Anwendungsfälle. Obgleich die Informatik wesentliche Techniken und Erkenntnisse der Informationsverarbeitung umfaßt, liegt die inhaltliche Kompetenz empirischen Wissens außerhalb ihrer Denomination. Als Strukturwissenschaft der Informationsgesellschaft sollte jedoch gerade die Wissensrepräsentation abstrakte Modelle bereitstellen, die eine Formulierung von Wahrheitskriterien empirischen Wissens erlauben. Abgesehen von der Beachtung einzelner empirischer Aspekte, fehlte bis jetzt ein ganzheitliches Modell empirischer Information. In dieser Arbeit ist die Entscheidung zur Konstruktion eines solchen Modells empirisch-terminologischer Information a) auf die Anwendung des wissenschaftstheoretischen Strukturalismus gefallen, wobei b) ein bestimmter Ansatz dessen Anwendung gewählt wurde.

Zu a) Der wissenschaftstheoretische Strukturalismus ist selbst ein sehr umfangreiches und voraussetzungsreiches Programm das zudem innerhalb der Informatik nur wenig verbreitet ist. Sowohl im formalen Stiel, als auch in dessen Notation, geht man innerhalb der wesentlichen Publikationen mitunter unkonventionelle Wege. Während man bezüglich der Verbreitung des Strukturalismus nur auf eine Zunahme hoffen kann, wird bei näherer Auseinandersetzung der Notation wahrscheinlich, daß deren unkonventionelle Form prinzipiell ‚heilbar‘ ist. Ein Ausbuchstabieren von Andeutungen und sprechender Bezeichner führte jedoch zu einer um so verklausulierteren und das Verständnis erschwerenden Darstellung. Sogesehen stellt die strukturalistische Notation von Wissenschaftstheorie bereits einen Kompromiß zwischen Komplexität der Sache und einer mathematisch einwandfreien Schreibweise dar.

Zu b) Zur Modellierung empirischen Wissens wurden Informationssysteme in strukturalistische Theorieelemente, Theorienetze oder Theorieevolution übertragen. Wo notwendig, wurde die Darstellung von Aspekten von Informationssystemen innerhalb verschiedener Publikationen in einer eigenen Notation vereinheitlicht. Sowohl die gewählten Schwerpunkte der Charakterisierung von Informationssystemen, als auch die Umsetzung einer Übertragung erlaubt auch andere Entscheidungen.

Unabhängig von diesen teils arbiträren Entscheidungen muß jedes umfassende Modell empirischer Information jedoch eine Reihe von Anforderungen erfüllen. 1) Jedes Modell empirischer Information muß die empirischen Daten bezüglich der Information wahr oder falsch ist, mit einschließen (Angabe intendierter Anwendungen). 2. Information muß zu empirischen Daten in ein wahrheitsfähiges Verhältnis (Angabe einer empirischen Behauptung) gesetzt werden. 3. Die Theoriegeladenheit Konzepten ist bei der Formulierung einer empirischen Behauptung zu beachten (Unterscheidung zwischen Beobachtungs- und theoretischer Sprache) 4. Sollen auch terminologische Anteile, also vor allem formale Ontologien, als Träger von Information gelten, müssen auch diese auf eine Basis empirischer Daten gestellt werden (Auszeichnung eines Groundings von Termen). Auch formale Ontologien und empirische Daten müssen in ein wahrheitsfähiges Verhältnis gesetzt werden (Angabe einer empirischen Behauptung des nicht-theoretischen Gehalts). 5. Informationen verschiedener Informationssysteme muß sich unter Beachtung des verteilten Informationsgehalts von empirischen Behauptungen, theoriegeladener Be-

griffe und terminologischer Information in ein wahrheitsfähiges Verhältnis setzen lassen (Definition einer Semantik für Brückenstrukturen). 6. Terminologische Information ist stark interessengeleitet und entspricht somit nur selten einem vollständigen Konsens. Die Heterogenität von Terminologien in Informationssystemen verschiedener Parteien muß im Sinne von Variantenverhältnissen wahrheitsfähig abgebildet werden können (Darstellung zusammenhängender Netzwerke). 7. Aspekte von Dauer und Wandel – also Information verschiedenen Versionsstandes muß wahrheitsfähig ins Verhältnis gesetzt werden (Angabe von Kriterien der Genidentität). Insbesondere die Auswirkung des Wandels von terminologischer auf empirische Information ist wahrheitsfähig abzubilden.

Auch wenn die hier erarbeitete Darstellung eines Modells empirischer und terminologischer Information sowie der passenden Methodik zu dessen Konstruktion kompliziert anmutet, liegt deren wesentliche Ursache in der komplexen Natur empirischer Information. Strukturwissenschaften bezeichnen Wissenschaften die abstrakte Modelle für Vorgänge bilden, die faktisch (also sowieso) auftreten. Die Wissensrepräsentation ist gemäß dieser besonderen Rolle zwischen formaler und empirischer Wissenschaft auf dem Weg, den empirischen Charakter von Information in ihren Modellbegriff zu integrieren.

Literaturverzeichnis

- [Abrett und Burstein 1986] ABRETT, Glenn ; BURSTEIN, Mark H.: The BBN Laboratories Knowledge Acquisition Project: KREME Knowledge Editing Environment. In: *DARPA Expert Systems Workshop, Pacific Grove*, Bold, Beranek, and Newman, Inc., 1986
- [Aristoteles 1985] ARISTOTELES: *Nikomachische Ethik*. F. Meiner, 1985. – dt. Übersetzung, Eugen Rolfes, 1921
- [Aristoteles 1995] ARISTOTELES: Kategorien. In: ROLFES, Eugen (Hrsg.): *Aristoteles. Philosophische Schriften*. Hamburg: Felix-Meiner Verlag, 1995
- [Arp und Smith 2008] ARP, Robert ; SMITH, Barry: Function, role and disposition in basic formal ontology. In: *Proceedings of Bio-Ontologies Workshop (ISMB 2008)*. Toronto, 2008, S. 45–48
- [Ashburner u. a. 2000] ASHBURNER, M. ; BALL, C. A. ; BLAKE, J. A. ; BOTSTEIN, D. ; BUTLER, H. ; CHERRY, J. M. ; DAVIS, A. P. ; DOLINSKI, K. ; DWIGHT, S. S. ; EPPIG, J. T. ; HARRIS, M. A. ; ISSEL-TARVER, D. P. Hilland L. ; LEWIS, A. Kasarskisand S. ; MATESE, J. C. ; RICHARDSON, J. E. ; RINGWALD, M. ; RUBIN, G. M. ; SHERLOCK, G.: Gene Ontology: tool for the unification of biology. In: *Nature Genetics* (2000), Nr. 25, S. 25–29
- [Baader u. a. 2003] BAADER, Franz (Hrsg.) ; CALVANESE, Diego (Hrsg.) ; MCGUINNESS, Deborah (Hrsg.) ; NARDI, Daniele (Hrsg.) ; PATEL-SCHNEIDER, Peter (Hrsg.): *The Description Logic Handbook: Theory, Implementation, and Applications*. New York : Cambridge University Press, 2003
- [Baader u. a. 2010] BAADER, Franz ; LUTZ, Carsten ; TURHAN, Anni-Yasmin: Small is Again Beautiful in Description Logics. In: *KI - Künstliche Intelligenz* 24 (2010), Nr. 1, S. 25–33. – ISSN 0933-1875
- [Baader und Nutt 2003] BAADER, Franz ; NUTT, Werner: *Basic Description Logics: Theory, Implementation, and Applications*. Kap. 2. New York : Cambridge University Press, 2003
- [Bach 2009] BACH, Joscha: *Principles of synthetic intelligence PSI: an architecture of motivated cognition*. Bd. 4. Oxford University Press, 2009
- [Balzer 1997] BALZER, Wolfgang: *Die Wissenschaft und ihre Methoden - Grundsätze der Wissenschaftstheorie - ein Lehrbuch*. Freiburg (Breisgau) : Alber, 1997
- [Balzer u. a. 1987] BALZER, Wolfgang ; MOULINES, Carles U. ; SNEED, Joseph D.: *An Architectonic for Science - the Structuralist Program*. Dordrecht : Reidel, 1987
- [Balzer und Sneed 1977] BALZER, Wolfgang ; SNEED, Joseph D.: Generalized Net Structures in Empirical Science. In: *Studia Logica* 36 (1977), Nr. 3, S. 195–211
- [Balzer und Ulises Moulines 1980] BALZER, Wolfgang ; ULISES MOULINES, C: On theoreticity. In: *Synthese* 44 (1980), Nr. 3, S. 467–494

- [Bao u. a. 2006] BAO, Jie ; CARAGEA, Doina ; HONAVAR, Vasant: Lecture Notes in Computer Science. In: MIZOGUCHI, Riichiro (Hrsg.) ; SHI, Zhongzhi (Hrsg.) ; GIUNCHIGLIA, Fausto (Hrsg.): *The Semantic Web – ASWC 2006* Bd. 4185. Springer Berlin / Heidelberg, 2006, Kap. Modular Ontologies - A Formal Investigation of Semantics and Expressivity, S. 616–631
- [Bartelborth 1996] BARTELBORTH, Thomas: *Begründungsstrategien – ein Weg durch die analytische Erkenntnistheorie*. Berlin : Akademie Verlag, 1996
- [Bechhofer u. a. 2004] BECHHOFFER, Sean ; HARMELEN, Frank v. ; HENDLER, Jim ; HORROCKS, Ian ; MCGUINNESS, Deborah ; PATEL-SCHNEIJDER, Peter ; STEIN, Lynn A. ; DEAN, Mike (Hrsg.) ; SCHREIJER, Guus (Hrsg.): OWL Web Ontology Language Reference. World Wide Web Consortium (W3C), February 10 2004. – Forschungsbericht. – URL <http://www.w3.org/TR/owl-ref/>
- [Bechtel und Hamilton 2007] BECHTEL, William ; HAMILTON, Andrew: Reduction, integration, and the unity of science: Natural, behavioral, and social sciences and the humanities. In: *General philosophy of science: Focal issues* (2007), S. 377–430
- [Beckstein u. a. 2014] BECKSTEIN, C. ; BÖCKER, S. ; BOGDAN, M. ; H. BRUELHEIDE, H. M. B. ; DENZLER, J. ; DITTRICH, P. ; GROSSE, I. ; HINNEBURG, A. ; KÖNIG-RIES, B. ; LÖFFLER, F. ; MARZ, M. ; MÜLLER-HANNEMANN, M. ; WINTER, M. ; ZIMMERMANN, W.: Explorative Analysis of Heterogeneous, Unstructured, and Uncertain Data: A Computer Science Perspective on Biodiversity Research. In: HELFERT, M. (Hrsg.) ; HOLZINGER, A. (Hrsg.) ; BELO, O. (Hrsg.) ; FRANCALANCI, C. (Hrsg.): *Proceedings of the 3rd International Conference on Data Management Technologies and Applications, DATA 2014, Vienna, Austria, August 29–31, 2014*, SCITEPRESS, 2014, S. 251–257
- [Bell u. a. 1979] BELL, Daniel ; SUMMERER, Siglinde ; KURZ, Gerda: *Die nachindustrielle Gesellschaft (The Coming of Post-Industrial Society", 1973)*. Rowohlt Reinbek bei Hamburg, 1979
- [Berners-Lee 1989] BERNERS-LEE, Tim: Information management: A proposal / CERN. URL <http://www.w3.org/History/1989/proposal.html>, 1989. – Forschungsbericht
- [Berners-Lee 1996] BERNERS-LEE, Tim: Generic resources. In: *Design Issues* (1996). – URL <http://www.w3.org/DesignIssues/Generic.html>
- [Berners-Lee u. a. 2001] BERNERS-LEE, Tim ; HENDLER, James ; LASSILA, Ora: Mein Computer versteht mich (aus dem Englischen: The Semantic Web, Scientific American, 2001). In: *Spektrum der Wissenschaft* (2001). – URL <http://www.spektrum.de/alias/internet/mein-computer-versteht-mich/827866>
- [Bernstein u. a. 2000] BERNSTEIN, Phillip A. ; HALEVY, Alon Y. ; POTTINGER, Rachel A.: A vision for management of complex models. In: *SIGMOD Rec.* 29 (2000), Nr. 4, S. 55–63. – ISSN 0163-5808
- [Beth 1953] BETH, Evert W.: On Padoa's method in the theory of definition. In: *Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen* 56 (1953), Nr. series A, S. 330–339
- [Bode 1997] BODE, Jürgen: Der Informationsbegriff in der Betriebswirtschaftslehre. In: *Schmalenbachs Zeitschrift für betriebswirtschaftliche Forschung* 49 (1997), Nr. 5, S. 449–468
- [Bodenreider u. a. 2007] BODENREIDER, Olivier ; SMITH, Barry ; KUMAR, Anand ;

- BURGUN, Anita: Investigating subsumption in SNOMED CT: an exploration into large description logic-based biomedical terminologies. In: *Artif Intell Med* 39 (2007), Mar, Nr. 3, S. 183–195. – URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.artmed.2006.12.003>
- [Boehm 1988] BOEHM, B. W.: A spiral model of software development and enhancement. In: *Computer* 21 (1988), may., Nr. 5, S. 61–72. – ISSN 0018-9162
- [Borgida und Serafini 2003] BORGIDA, Alex ; SERAFINI, Luciano: Distributed Description Logics: Assimilating Information from Peer Sources. In: *Journal on Data Semantics*, Springer, 2003 (LNCS), S. 153–184
- [Borst u. a. 1995] BORST, Pim ; AKKERMANS, Hans ; POS, Anita ; TOP, Jan: The PhysSys ontology for physical systems. In: *Working papers of the ninth international workshop on qualitative reasoning*, 1995, S. 11–21
- [Bouquet u. a. 2005] BOUQUET, Paolo ; EHRIG, Marc ; EUZENAT, Jerome ; FRANCONI, Enrico ; HITZLER, Pascal ; KRÖTZSCH, Markus ; SERAFINI, Luciano ; STAMOU, Giorgos ; SURE, York ; TES-SARIS, Sergio: Specification of a common framework for characterizing alignment / KnowledgeWeb Network of Excellence. URL <http://knowledgeweb.semanticweb.org/semanticportal/deliverables/D2.2.1v2.pdf>, 2005 (Deliverable D2.2.1). – Forschungsbericht
- [Bourbaki 1974] BOURBAKI, N.: Die Architektur der Mathematik. In: OTTE, Michael (Hrsg.): *Mathematiker über die Mathematik*. Springer, 1974, S. 140–159. – dt. Übersetzung von L’architecture des mathématiques, in F.le Lionnais (ed.), Les grands courants de la pensée mathématique, Blanchard, Paris 1948
- [Brachman 1978] BRACHMAN, Ronald J.: Structured inheritance networks. In: *Research in Natural Language Understanding, Quarterly Progress Report 1* (1978), S. 36–78
- [Brachman und Schmolze 1985] BRACHMAN, Ronald R. ; SCHMOLZE, James G.: An overview of the KL-ONE knowledge representation system. In: *Cognitive Science* 9 (1985), April, Nr. 2, S. 171–216
- [Brown und Runge 2000] BROWN, David J. ; RUNGE, Karl: Library interface versioning in solaris and linux. In: *Proceedings of the 4th annual Linux Showcase & Conference* Bd. 4. Berkeley, CA, USA : USENIX Association, 2000, S. 153–162
- [Bruijn u. a. 2004] BRUIJN, Jos d. ; MARTÍN-RECUERDA, Francisco ; MANOV, Dimitar ; EHRIG, Marc: State-of-the-art survey on Ontology Merging and Aligning. Innsbruck : Digital Enterprise Research Institute, University of Innsbruck, 2004. – Forschungsbericht. – URL <http://www.sekt-project.com/rd/deliverables/wp04/sekt-d-4-2-1-Mediation-survey-final.pdf>
- [Buchanan u. a. 1969] BUCHANAN, Bruce G. ; SUTHERLAND, Georgia L. ; FEIGENBAUM, E. A.: Heuristic DENDRAL: A Program for Generating Explanatory Hypotheses in Organic Chemistry. In: MELTZER, B. (Hrsg.) ; MICHIE, D. (Hrsg.): *Machine Intelligence*. Edinburgh University Press, 1969, S. 209–254
- [Calvanese u. a. 1997] CALVANESE, Diego ; DE GIACOMO, Giuseppe ; LENZERINI, Maurizio: Conjunctive Query Containment in Description Logics with n-ary Relations. In: *Description Logics*, 1997
- [Calvanese u. a. 2002] CALVANESE, Diego ; DE GIACOMO, Giuseppe ; LENZERINI, Maurizio: A Framework for Ontology Integration. In: CRUZ, Isabel (Hrsg.) ; DECKER, Stefan (Hrsg.) ; EUZENAT, Jérôme (Hrsg.) ; MCGUINNESS, Deborah (Hrsg.): *The*

- Emerging Semantic Web – Selected Papers from the First Semantic Web Working Symposium*. IOS Press, 2002, S. 201–214
- [Calvanese u. a. 2004] CALVANESE, Diego ; DE GIACOMO, Giuseppe ; LENZERINI, Maurizio ; ROSATI, Riccardo: Logical foundations of peer-to-peer data integration. In: *PODS '04: Proceedings of the twenty-third ACM SIGMOD-SIGACT-SIGART symposium on Principles of database systems*. New York, NY, USA : ACM, 2004, S. 241–251. – ISBN 158113858X
- [Carnap 1960] CARNAP, Rudolf: Theoretische Begriffe der Wissenschaft. In: *Zeitschrift für philosophische Forschung* 14 (1960), Nr. 2, S. 209–233. – URL <http://www.jstor.org/stable/20481118>. – Übersetz von Alfred Scheibal. Englischer Titel: The Methodological Character of Theoretical Concepts; 1956. – ISSN 00443301
- [Carnap 1998] CARNAP, Rudolf: *Der logische Aufbau der Welt*. 2. Hamburg : Meiner, 1998 (Philosophische Bibliothek, 514)
- [Cartwright 1999] CARTWRIGHT, Nancy: *The dappled world: A study of the boundaries of science*. Cambridge University Press, 1999
- [Charpa 1996] CHARPA, Ulrich: *Grundprobleme der Wissenschaftsphilosophie*. Paderborn : Schöningh, 1996 (UTB 1952)
- [Chaudhri u. a. 1998] CHAUDHRI, V. K. ; FARQUHAR, A. ; FIKES, R. ; KARP, P. D. ; RICE, J. P.: Open Knowledge Base Connectivity 2.0. In: *Knowledge Systems Laboratory, Stanford* (1998)
- [Chen 1976] CHEN, Peter Pin-Shan: The Entity-Relationship Model–Toward a Unified View of Data. In: *ACM Transactions on Database Systems* 1 (1976), Nr. 1, S. 9–36
- [Cimiano u. a. 2005] CIMIANO, Philipp ; HOTH, Andreas ; STAAB, Steffen: Learning Concept Hierarchies from Text Corpora using Formal Concept Analysis. In: *J. Artif. Intell. Res.(JAIR)* 24 (2005), S. 305–339
- [Collins und Quillian 1970] COLLINS, Allan M. ; QUILLIAN, M. R.: Does category size affect categorization time? In: *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior* 9 (1970), Nr. 4, S. 432–438. – ISSN 0022-5371
- [Cullen und Bryman 1988] CULLEN, J ; BRYMAN, A: The knowledge acquisition bottleneck: time for reassessment? In: *Expert Systems* 5 (1988), Nr. 3, S. 216–225
- [d'Aquin u. a. 2009] D'AQUIN, Mathieu ; SCHLICHT, Anne ; STUCKENSCHMIDT, Heiner ; SABOU, Marta: Criteria and evaluation for ontology modularization techniques. In: *Modular ontologies*. Springer, 2009, S. 67–89
- [Darwin 1985] DARWIN, Charles ; BURROW, J. W. (Hrsg.): *The origin of species : by means of natural selection or the preservation of favoured races in the struggle for life*. London [u.a.] : Penguin Books, 1985
- [Davis u. a. 1993] DAVIS, Randall ; SHROBE, Howard ; SZOLOVITS, Peter: What is a knowledge representation? In: *AI magazine* 14 (1993), Nr. 1, S. 17. – URL <http://groups.csail.mit.edu/medg/ftp/psz/k-rep.html>
- [De Nicola u. a. 2009] DE NICOLA, Antonio ; MISSIKOFF, Michele ; NAVIGLI, Roberto: A software engineering approach to ontology building. In: *Inf. Syst.* 34 (2009), Nr. 2, S. 258–275. – ISSN 0306-4379
- [Dellschaft und Staab 2006] DELLSCHAFT, Klaas ; STAAB, Steffen: On how to perform

- a gold standard based evaluation of ontology learning. In: *The Semantic Web-ISWC 2006*. Springer, 2006, S. 228–241
- [Diamond und Ordunio 2005] DIAMOND, Jared M. ; ORDUNIO, Doug: *Guns, germs, and steel*. National Geographic, 2005
- [Diederich 1989] DIEDERICH, Werner: The Development of Structuralism, A Reevaluation on the Occasion of W. Stegmüller's "Theorie und Erfahrung", pt. 3 (1986). In: *Erkenntnis* 30 (1989), S. 363–386
- [Diederich 1996] DIEDERICH, Werner: Pragmatic and diachronic aspects of structuralism. In: *Structuralist Theory of Science. Focal Issues, New Results*. Berlin/New York: De Gruyter (1996), S. 75–82
- [Ding u. a. 2002] DING, Ying ; FENSEL, Dieter ; KLEIN, Michel ; OMELAYENKO, Borys: The semantic web: yet another hip? In: *Data & Knowledge Engineering* 41 (2002), Nr. 2-3, S. 205–227. – ISSN 0169-023X
- [Ding und Foo 2002] DING, Ying ; FOO, Schubert: Ontology research and development. Part 1-a review of ontology generation. In: *Journal of information science* 28 (2002), Nr. 2, S. 123–136
- [Duhem 1954] DUHEM, Paul: Physical theory and experiment. In: VUILLEMIN, Jules (Hrsg.): *The Aim and Structure of Physical Theory*. D. Reidel, 1954, S. 180–218. – translated by Philip P. Wiener, originally published in French in 1906
- [Dyreson u. a. 1994] DYRESON, Curtis ; GRANDI, Fabio ; KÄFER, Wolfgang ; KLINE, Nick ; LORENTZOS, Nikos ; MITSOPOULOS, Yannis ; MONTANARI, Angelo ; NONEN, Daniel ; PERESSI, Elisa ; PERNICI, Barbara ; RODDICK, John F. ; SARDA, Nandlal L. ; SCALAS, Maria R. ; SEGEV, Arie ; SNODGRASS, Richard T. ; SOO, Mike D. ; TANSEL, Abdullah ; TIBERIO, Paolo ; WIEDERHOLD, Gio: A consensus glossary of temporal database concepts. In: *SIGMOD Rec.* 23 (1994), Nr. 1, S. 52–64. – ISSN 0163-5808
- [Ehrig und Staab 2004] EHRIG, Marc ; STAAB, Steffen: QOM — Quick Ontology Mapping. In: MCILRAITH, Sheila A. (Hrsg.) ; PLEXOUSAKIS, Dimitris (Hrsg.) ; HARMELEN, Frank v. (Hrsg.): *Proceedings of the Third International Semantic Web Conference* Bd. volume 3298. Hiroshima, Japan : Springer, 2004
- [Ehrig und Sure 2004] EHRIG, Marc ; SURE, York: Ontology Mapping - An Integrated Approach. In: *University of Karlsruhe* (2004)
- [Einstein 1953] EINSTEIN, Albert ; SEELIG, C. (Hrsg.): *Mein Weltbild*. Europa Verlag, 1953. – 269 S. – Erstdruck 1934
- [Engesser und Claus 1993] ENGESSER, Hermann ; CLAUS, Volker: *DudenInformatik": ein Sachlexikon für Studium und Praxis*. Dudenverl., 1993
- [Euzenat und Shvaiko 2013] EUZENAT, Jérôme ; SHVAIKO, Pavel: Basic Similarity Measures. In: *Ontology Matching*. Springer, 2013, S. 85–120
- [Euzenat und Shvaiko 2007] EUZENAT, Jérôme ; SHVAIKO, Pavel: *Ontology matching*. Heidelberg : Springer-Verlag, 2007. – ISBN 3-540-49611-4
- [Farquhar u. a. 1997] FARQUHAR, Adam ; FIKES, Richard ; RICE, James: The ontolingua server: A tool for collaborative ontology construction. In: *International journal of human-computer studies* 46 (1997), Nr. 6, S. 707–727
- [Faure und Nedellec 1999] FAURE, David ; NEDELLEC, Claire: Knowledge acquisition of predicate argument structures from technical texts using machine learning: The

- system ASIUM. In: *Knowledge Acquisition, Modeling and Management*. Springer, 1999, S. 329–334
- [Fensel u. a. 2001] FENSEL, Dieter ; HARMELEN, Frank v. ; HORROCKS, Ian ; MCGUINNESS, Deborah L. ; PATEL-SCHNEIDER, Peter F.: OIL An Ontology Infrastructure for the Semantic Web. In: *IEEE Intelligent Systems* 16 (2001)
- [Feyerabend 1962] FEYERABEND, P. K.: Explanation, Reduction and Empiricism. In: *Minnesota Studies in the Philosophy of Science* 3 (1962), S. 28–97
- [Feyerabend 1986] FEYERABEND, Paul K.: *Wider den Methodenzwang*. Frankfurt am Main : Suhrkamp, 1986
- [Fleck 1999] FLECK, Ludwik ; SCHÄFER, Lothar (Hrsg.) ; SCHNELLE, Thomas (Hrsg.): *Entstehung und Entwicklung einer wissenschaftlichen Tatsache: Einführung in die Lehre vom Denkstil und Denkkollektiv*. 4. Aufl. Frankfurt am Main : Suhrkamp, 1999 (Suhrkamp-Taschenbuch Wissenschaft 312). – ISBN 3518279122
- [Flouris u. a. 2008] FLOURIS, Giorgos ; MANAKANATAS, Dimitris ; KONKYLAKIS, Haridimos ; PLEXOUSAKIS, Dimitris ; ANTONIOU, Grigoris: Ontology change: classification and survey. In: *The Knowledge Engineering Review* 23 (2008), May, Nr. 02, S. 117–152
- [Flouris u. a. 2006] FLOURIS, Giorgos ; PLEXOUSAKIS, Dimitris ; ANTONIOU, Grigoris: Evolving Ontology Evolution. In: WIEDERMANN, J. (Hrsg.): *SOFSEM 2006: Theory and Practice of Computer Science* Bd. 3831/2006. Berlin : Springer, 2006, S. 14–29
- [Fodor 1974] FODOR, J. A.: Special sciences (or: The disunity of science as a working hypothesis). In: *Synthese* 28 (1974), oct, Nr. 2, S. 97–115
- [Foo 1995] FOO, Norman: Ontology revision. In: ELLIS, Gerard (Hrsg.) ; LEVINSON, Robert (Hrsg.) ; RICH, William (Hrsg.) ; SOWA, JohnF. (Hrsg.): *Conceptual Structures: Applications, Implementation and Theory* Bd. 954. Berlin, Heidelberg : Springer, 1995, S. 16–31. – ISBN 978-3-540-60161-6
- [van Fraassen 1980] FRAASSEN, Bas C. van: *The scientific image*. Oxford University Press, 1980
- [van Fraassen 1991] FRAASSEN, Bas C. van: *Quantum Mechanics – An Empiricist View*. Oxford University Press, November 1991
- [Frege 1884] FREGE, Gottlob: *Die Grundlagen der Arithmetik, eine logisch mathematische Untersuchung über den Begriff der Zahl*. Breslau : W. Koebner, 1884
- [Frege 1971] FREGE, Gottlob: Logik in der Mathematik. In: GABRIEL, Gottfried (Hrsg.): *Gottlob Frege. Schriften zur Logik und Sprachphilosophie: aus dem Nachlaß*. Hamburg: Felix Meiner, 1971
- [Fürst und Trichet 2006] FÜRST, Frédéric ; TRICHET, Francky: Heavyweight ontology engineering. In: *On the Move to Meaningful Internet Systems 2006: OTM 2006 Workshops* Springer (Veranst.), 2006, S. 38–39
- [Gabbay 1996] GABBAY, D. M.: Fibred Semantics and the Weaving of Logics Part 1: Modal and Intuitionistic Logics. In: *The Journal of Symbolic Logic* 61 (1996), Nr. 4, S. 1057–1120. – ISSN 00224812
- [Gähde 1990] GÄHDE, Ulrich: On innertheoretical conditions for theoretical terms. In: *Erkenntnis* 32 (1990), Nr. 2, S. 215–233
- [Gangemi u. a. 1999] GANGEMI, Aldo ; PISANELLI, Domenico M. ; STEVE, Geri: An overview of the ONIONS project: Applying ontologies to the integration of medical

- terminologies. In: *Data & Knowledge Engineering* 31 (1999), Nr. 2, S. 183–220. – ISSN 0169-023X
- [Ganter und Wille 2013] GANTER, Bernhard ; WILLE, Rudolf: *Formale Begriffsanalyse: mathematische Grundlagen*. Springer-Verlag, 2013
- [Genesereth und Fikes 1992] GENESERETH, Michael R. ; FIKES, Richard E.: Knowledge Interchange Format. Computer Science Department, Stanford University, California, 1992 (Logic Group Technical Report Logic-92-1). – Forschungsbericht. – URL <http://logic.stanford.edu/kif/Hypertext/kif-manual.html>
- [Gesang 2005] GESANG, Bernward (Hrsg.): *Schriften zur Erkenntnis- und Wissenschaftstheorie*. Bd. 7: *Deskriptive oder normative Wissenschaftstheorie?* Heusenstamm : Ontos Verlag, 2005
- [Ghidini und Serafini 1998] GHIDINI, Chiara ; SERAFINI, Luciano: Distributed First Order Logics. In: *Frontiers Of Combining Systems 2, Studies in Logic and Computation*, Research Studies Press, 1998, S. 121–140
- [Giunchiglia und Zaihrayeu 2009] GIUNCHIGLIA, Fausto ; ZAIHRA YE U, Ilya: Lightweight ontologies. In: *Encyclopedia of Database Systems*. Springer, 2009, S. 1613–1619
- [Goldstein und Papert 1977] GOLDSTEIN, Ira ; PAPERT, Seymour: Artificial Intelligence, Language, and the Study of Knowledge. In: *Cognitive Science* 1 (1977), S. 84–123
- [Graham 1999] GRAHAM, Gordon: *The Internet: a philosophical inquiry*. New York : Psychology Press, 1999
- [Grau u. a. 2013] GRAU, Bernardo C. ; DRAGISIC, Zlatan ; ECKERT, Kai ; EUZENAT, Jérôme ; FERRARA, Alfio ; GRANADA, Roger ; IVANOVA, Valentina ; JIMÉNEZ-RUIZ, Ernesto ; KEMPF, Andreas O. ; LAMBRIX, Patrick u. a.: Results of the ontology alignment evaluation initiative 2013. In: *Proc. 8th ISWC workshop on ontology matching (OM)* No commercial editor. (Veranst.), URL http://www.dit.unitn.it/~p2p/OM-2013/oaei13_paper0.pdf, 2013, S. 61–100
- [Gray 2009] GRAY, Jim: Jim Gray on eScience: A Transformed Scientific Method. In: HEY, Tony (Hrsg.) ; TANSLEY, Stewart (Hrsg.) ; TOLLE, Kristin (Hrsg.): *The Fourth Paradigm: Data-Intensive Scientific Discovery*. Redmond, Washington : Microsoft Research, 2009. – URL <http://research.microsoft.com/en-us/collaboration/fourthparadigm/>
- [Gruber 1993a] GRUBER, Thomas: Toward Principles for the Design of Ontologies Used for Knowledge Sharing. In: *International Journal Human-Computer Studies* 43 (1993), November, Nr. 5-6, S. 907–928
- [Gruber 1993b] GRUBER, Thomas R.: A Translation Approach to Portable Ontology Specifications. In: *Knowledge Acquisition* 5 (1993), Nr. 2, S. 1–26
- [Gruber und Olsen 1994] GRUBER, Thomas R. ; OLSEN, Gregory R.: An Ontology for Engineering Mathematics. In: DOYLE, Jon (Hrsg.) ; TORASSO, Piero (Hrsg.) ; SANDEWALL, Erik (Hrsg.): *Fourth International Conference on Principles of Knowledge Representation and Reasoning*, Morgan Kaufmann, 1994. – URL <http://www-ksl.stanford.edu/knowledge-sharing/papers/engmath.html>
- [Grütter 2006] GRÜTTER, Rolf: Software-Agenten im Semantic Web. In: *Informatik-Spektrum* 29 (2006), Februar, Nr. 1, S. 3–13
- [Guarino und Welty 2000] GUARINO, N. ; WELTY, C.: A Formal Ontology of Properties.

- In: DIENG, R. (Hrsg.) ; CORBY, O. (Hrsg.): *Knowledge Engineering and Knowledge Management: Methods, Models and Tools. 12th International Conference, EKAW2000*, Springer, 2000 (LNCS), S. 97–112
- [Guarino 1998] GUARINO, Nicola: Formal Ontology and Information Systems. In: GUARINO, N. (Hrsg.): *Formal Ontology in Information Systems*. Amsterdam : IOS Press, June 1998 (Proceedings of FOIS), S. 3–15
- [Guarino und Giaretta 1995] GUARINO, Nicola ; GIARETTA, Pierdaniele: Ontologies and Knowledge Bases – Towards a Terminological Clarification. In: MARS, N. J. I. (Hrsg.): *Towards Very Large Knowledge Bases: Knowledge Building and Knowledge Sharing*. Amsterdam : IOS Press, 1995, S. 25–32
- [Guarino und Welty 2004] GUARINO, Nicola ; WELTY, Christopher: An Overview of OntoClean. In: *Handbook on Ontologies*. Berlin, Heidelberg : Springer Verlag, 2004, Kap. An Overview of OntoClean, S. 151–159
- [Gärdenfors 1992] GÄRDENFORS, Peter: *Belief Revision*. Kap. Belief revision: An introduction. Cambridge : Cambridge University Press, 1992
- [Gómez und Olivé 2002] GÓMEZ, Cristina ; OLIVÉ, Antoni: Evolving Partitions in Conceptual Schemas in the UML. In: *Advanced Information Systems Engineering: 14th International Conference, CAiSE 2002 Toronto, Canada, May 27-31, 2002. Proceedings* Bd. 2348/2002. Berlin : Springer, 2002, S. 467
- [Gómez-Pérez u. a. 2004] GÓMEZ-PÉREZ, A. ; FERNÁNDEZ-LÓPEZ, M. ; CORCHO, O.: *Ontological engineering: with examples from the areas of knowledge management, e-commerce and the semantic web*. Berlin : Springer, 2004
- [Haarslev u. a. 2012] HAARSLEV, Volker ; HIDDE, Kay ; MÖLLER, Ralf ; WESSEL, Michael: The RacerPro knowledge representation and reasoning system. In: *Semantic Web Journal* 3 (2012), Nr. 3, S. 267–277
- [Haarslev und Möller 2003] HAARSLEV, Volker ; MÖLLER, Ralf: Description logic systems with concrete domains: Applications for the semantic web. In: *In Int. Workshop on KR meets Databases* Bd. 79, CEUR-WS.org, 2003, S. 1–12
- [Hahn und Romacker 2001] HAHN, Udo ; ROMACKER, Martin: The SYNDIKATE text Knowledge base generator. In: *Proceedings of the first international conference on Human language technology research* Association for Computational Linguistics (Veranst.), 2001, S. 1–6
- [Halpin 2009] HALPIN, Harry: Social Meaning on the Web: From Wittgenstein To Search Engines. In: *European Semantic Web Conference 2009*, 2009
- [Hanson 1965] HANSON, Norwood R.: *Patterns of discovery: an inquiry into the conceptual foundations of science...* CUP Archive, 1965
- [Hefflin u. a. 1999] HEFLIN, Jeff ; HENDLER, James ; LUKE, Sean: Coping with changing ontologies in a distributed environment. In: *AAAI-99 Workshop on Ontology Management*, 1999, S. 74–79
- [Hefflin und Pan 2004] HEFLIN, Jeff ; PAN, Zhengxiang: A Model Theoretic Semantics for Ontology Versioning. In: McILRAITH, Sheila A. (Hrsg.) ; PLEXOUSAKIS, Dimitris (Hrsg.) ; HARMELEN, Frank v. (Hrsg.): *International Semantic Web Conference* Bd. 3298, Springer, 2004, S. 62–76. – URL <http://swat.cse.lehigh.edu/pubs/hefflin04b.pdf>

- [Hempel 1958] HEMPEL, Carl G.: The theoretician's dilemma: A study in the logic of theory construction. In: *Minnesota Studies in the Philosophy of Science* 2 (1958), S. 173–226
- [Hempel und Oppenheim 1948] HEMPEL, Carl G. ; OPPENHEIM, Paul: Studies in the Logic of Explanation. In: *Philosophy of Science* (1948)
- [Hendler und McGuinness 2000] HENDLER, James ; MCGUINNESS, Deborah L.: The DARPA Agent Markup Language. In: *IEEE Intelligent Systems* 15 (2000), Nr. 6, S. 67–73
- [Hilbert und López 2011] HILBERT, Martin ; LÓPEZ, Priscila: The World's Technological Capacity to Store, Communicate, and Compute Information. In: *Science* 332 (2011), Nr. 6025, S. 60–65. – URL <http://www.sciencemag.org/content/332/6025/60.abstract>
- [Hitzler u. a. 2005] HITZLER, Pascal ; KRÖTZSCH, Markus ; EHRIG, Marc ; SURE, York: What Is Ontology Merging?: – A Category-Theoretical Perspective Using Pushouts. In: SHVAIKO, Pavel (Hrsg.) ; EUZENAT, Jerome (Hrsg.) ; LEGER, Alain (Hrsg.) ; MCGUINNESS, Deborah L. (Hrsg.) ; WACHE, Holger (Hrsg.): *Proceedings of the First International Workshop on Contexts and Ontologies: Theory, Practice and Applications (C&O). Workshop at the 20th National Conference on Artificial Intelligence, AAAI-05, Pittsburgh, Pennsylvania, July 2005*, AAAI Press, Menlo Park, California, JUL 2005 (Technical Report WS-05-01), S. 104–107
- [hmk. u. a. 2007] HMK. ; HOLL. ; MK.: Europäische Kommission plant Verbot des Begriffs ‚Apfelwein‘. In: *Frankfurter Allgemeine Zeitung* (2007), Nr. 255, S. 6
- [Homer 2002] HOMER, Odyssee: Übertragen von Johann Heinrich Voß. In: *München 1979* (2002)
- [Hoog 1998] HOOG, Robert d.: 1: Achievements and Prospects. In: LIEBOWITZ, Jay (Hrsg.): *The handbook of applied expert systems*. Boca Raton, Florida : CRC Press LLC, 1998, Kap. Methodologies for Building Knowledge-Based Systems, S. 1–1
- [IAU 2006] IAU: IAU 2006 General Assembly: Result of the IAU Resolution votes. Prague, August 2006. – Forschungsbericht. – URL http://www.iau.org/public_press/news/detail/iau0603/
- [ICD-10 Transition Workgroup 2003] ICD-10 TRANSITION WORKGROUP: The ICD-10 Transition and Public Health Surveillance - What You Need to Know / Centers for disease control and prevention. URL http://www.cdc.gov/nchs/icd/data/cdc_icd-10_transition_factsheet_12_2013.pdf, 2003. – Forschungsbericht
- [Kalfoglou und Schorlemmer 2005] KALFOGLOU, Yannis ; SCHORLEMMER, W. M.: Ontology Mapping: The State of the Art. In: KALFOGLOU, Y. (Hrsg.) ; SCHORLEMMER, M. (Hrsg.) ; SHETH, A. (Hrsg.) ; STAAB, S. (Hrsg.) ; USCHOLD, M. (Hrsg.): *Semantic Interoperability and Integration*, IBFI, Schloss Dagstuhl, Germany, 2005 (Dagstuhl Seminar Proceedings)
- [Kalinski 1989] KALINSKI, J.: Die (Re-)Präsentation von Wissen. In: BECKER, B. (Hrsg.): *Zur Terminologie in der Kognitionsforschung*. St. Augustin, 1989 (Arbeitspapiere der GMD 385), S. 242–254
- [Kifer und Lausen 1989] KIFER, Michael ; LAUSEN, Georg: F-logic: A Higher-order

- Language for Reasoning About Objects, Inheritance, and Scheme. In: *SIGMOD Rec.* 18 (1989), Juni, Nr. 2, S. 134–146. – ISSN 0163-5808
- [Klein und Fensel 2001] KLEIN, Michael ; FENSEL, Dieter: Ontology Versioning on the Semantic Web. In: *Proc. 1st Int. Semantic Web Working Symp.* Stanford University, CA, USA, 2001, S. 75–91
- [Klein u. a. 2002] KLEIN, Michel ; FENSEL, Dieter ; KIRYAKOV, Atanas ; OGNJANOV, Damyan: Ontology versioning and change detection on the web. In: *Knowledge Engineering and Knowledge Management: Ontologies and the Semantic Web.* Springer, 2002, S. 197–212
- [Knüpfer u. a. 2013] KNÜPFER, Christian ; BECKSTEIN, Clemens ; DITTRICH, Peter ; NOVÈRE, Nicolas L.: Structure, function, and behaviour of computational models in systems biology. In: *BMC systems biology* 7 (2013), Nr. 1, S. 43
- [Kuhlen 1995] KUHLEN, Rainer: *Informationsmarkt. Chancen und Risiken der Kommerzialisierung von Wissen.* Konstanz : UVK Universitätsverlag, 1995
- [Kuhn 1976] KUHN, Thomas S.: *Die Struktur wissenschaftlicher Revolutionen.* 2. Auflage. Frankfurt : Suhrkamp Taschenbuch Verlag, 1976
- [Kuhn 1993] KUHN, Thomas S.: *Die Struktur wissenschaftlicher Revolutionen [Aus dem Amerikan. von Kurt Simon. Für die 2. Aufl. ist die Übers. von Hermann Vetter rev. worden].* 2. Frankfurt am Main : Suhrkamp, 1993
- [Kuipers 2007] KUIPERS, Theo A. F.: Laws, Theories, and Research Programs. North Holland, 2007 (Handbook of the Philosophy of Science), S. 1–95
- [Kutz u. a. 2004] KUTZ, Oliver ; LUTZ, Carsten ; WOLTER, Frank ; ZAKHARYASCHEV, Michael: E-connections of abstract description systems. In: *Artificial Intelligence* 156 (2004), Nr. 1, S. 1–73. – ISSN 0004-3702
- [Lakatos 1974] LAKATOS, Imre: Falsifikation und die Methodologie wissenschaftlicher Forschungsprogramme. In: LAKATOS, Imre (Hrsg.) ; MUSGRAVE, Alan (Hrsg.): *Kritik und Erkenntnisfortschritt.* Vieweg, 1974, S. 89–189
- [Lakatos 1987] LAKATOS, Imre: *Die Methodologie der wissenschaftlichen Forschungsprogramme.* Braunschweig, Wiesbaden : Vieweg, 1987
- [Lane 1966] LANE, Robert E.: The Decline of Politics and Ideology in a Knowledgeable Society. In: *American Sociological Review* 31 (1966), Nr. 5, S. –649. – URL <http://www.jstor.org/stable/2091856>. – ISSN 00031224
- [Lassila und Swick 1999] LASSILA, Ora ; SWICK, Ralph R.: *Resource Description Framework (RDF) Model and Syntax Specification.* 1999
- [Laudan 1983] LAUDAN, Larry: The Demise of the Demarcation Problem. In: COHEN, R.S. (Hrsg.) ; LAUDAN, L. (Hrsg.): *Physics, Philosophy and Psychoanalysis* Bd. 76. Springer Netherlands, 1983, S. 111–127. – ISBN 978-94-009-7057-1
- [Leenheer u. a. 2006] LEENHEER, Pieter D. ; KOPECKY, Jacek ; SHARF, Erel: Requirements & Design for an Ontology Versioning Tool. Data, Information, and Process Integration with Semantic Web Services - Project DIP -, DIP deliverable D2.4 2006. – Forschungsbericht. DIP deliverable D2.4
- [Leenheer und Mens 2008] LEENHEER, Pieter D. ; MENS, Tom: Ontology Evolution – State of the Art & Future Directions. In: HEPP, Martin (Hrsg.) ; LEENHEER, Pieter d.

- (Hrsg.) ; MOOR, Aldo d. (Hrsg.) ; SURE, York (Hrsg.): *Ontology management: semantic web, semantic web services, and business applications*. Springer, 2008, S. 131–176
- [Lenat 1995] LENAT, Douglas B.: CYC: A large-scale investment in knowledge infrastructure. In: *Communications of the ACM* 38 (1995), Nr. 11, S. 33–38
- [Lenzerini 2002] LENZERINI, Maurizio: Data integration: a theoretical perspective. In: *PODS '02: Proceedings of the twenty-first ACM SIGMOD-SIGACT-SIGART symposium on Principles of database systems*. New York, NY, USA : ACM, 2002, S. 233–246. – ISBN 1-58113-507-6
- [Lewontin 1970] LEWONTIN, Richard C.: The units of selection. In: *Annual review of ecology and systematics* (1970), S. 1–18
- [Ludwig 1984] LUDWIG, Günther: Restriction and Embedding. In: BALZER, Wolfgang (Hrsg.) ; PEARCE, David A. (Hrsg.) ; SCHMIDT, Heinz-Jürgen (Hrsg.): *Reduction in Science*. Dordrecht : D. Reidel, 1984, Kap. Reduction in science – Structure, examples, philosophical problems
- [Luft und Kötter 1994] LUFT, Alfred L. ; KÖTTER, Rudolf: *Informatik-eine moderne Wissenstechnik*. BI-Wiss.-Verlag, 1994
- [Luke u. a. 1996] LUKE, Sean ; SPECTOR, Lee ; RAGER, David: Ontology-Based Knowledge Discovery on the World-Wide Web. In: ARTIFICIAL INTELLIGENCE, American A. for (Hrsg.): *Proceedings of the Workshop on Internet-based Information Systems*, AAAI Press, 1996. – URL <http://www.cs.umd.edu/projects/plus/SHOE/pubs/aaai-paper.html>
- [MacGregor 1991a] MACGREGOR, Robert: The evolving technology of classification-based knowledge representation systems. In: *Principles of semantic networks* (1991), S. 385–400
- [MacGregor 1991b] MACGREGOR, Robert M.: Inside the LOOM description classifier. In: *SIGART Bull.* 2 (1991), Nr. 3, S. 88–92. – ISSN 0163-5719
- [Maedche u. a. 2002] MAEDCHE, Alexander ; MOTIK, Boris ; STOJANOVIC, Ljiljana ; STUDER, Rudi ; VOLZ, Raphael: Managing multiple ontologies and ontology evolution in ontologging. In: *Intelligent Information Processing*. Springer, 2002, S. 51–63
- [Maedche und Staab 2002] MAEDCHE, Alexander ; STAAB, Steffen: Measuring similarity between ontologies. In: *Knowledge engineering and knowledge management: Ontologies and the semantic web*. Springer, 2002, S. 251–263
- [Mahr 2009] MAHR, Bernd: Die informatik und die logik der modelle. In: *Informatik-Spektrum* 32 (2009), Nr. 3, S. 228–249
- [Makinson 1985] MAKINSON, David: How to Give It up: A Survey of Some Formal Aspects of the Logic of Theory Change. In: *Synthese* 62 (1985), Nr. 3, S. 347–363. – ISSN 00397857
- [McCarthy und Hayes 1969] MCCARTHY, John ; HAYES, Patrick J.: Some philosophical problems from the standpoint of artificial intelligence. In: *Readings in artificial intelligence* (1969), S. 431–450
- [McCarthy u. a. 1955] MCCARTHY, John ; MINSKY, Marvin ; ROCHESTER, Nathan ; SHANNON, Claude: A Proposal for the Dartmouth Summer Research Project on Artificial Intelligence. (1955). – URL <http://www-formal.stanford.edu/jmc/history/dartmouth/dartmouth.html>

- [McDermid und Denvir 1991] MCDERMID, John ; DENVIR, Tim: *Software engineer's reference book*. Kap. Introduction to part I, S. 1–8, Elsevier, 1991
- [McDermott 1993] MCDERMOTT, Drew: Building large knowledge-based systems: Representation and inference in the cyc project : D.B. Lenat and R.V. Guha. In: *Artificial Intelligence* 61 (1993), Nr. 1, S. 53–63. – ISSN 0004-3702
- [McKinsey und Suppes 1953] MCKINSEY, J. C. C. ; SUPPES, Patrick: Philosophy and the Axiomatic Foundations of Physics. In: *Proceedings of the Eleventh International Congress of Philosophy* Bd. 6, 1953, S. 49–54
- [Miller 1995] MILLER, George A.: WordNet: a lexical database for English. In: *Communications of the ACM* 38 (1995), Nr. 11, S. 39–41
- [Miller u. a. 1953] MILLER, Stanley L. u. a.: A production of amino acids under possible primitive earth conditions. In: *Science* 117 (1953), Nr. 3046, S. 528–529
- [Minsky 1974] MINSKY, Marvin: A Framework for Representing Knowledge. MIT-AI Laboratory, June 1974 (306). – Forschungsbericht. – URL <http://web.media.mit.edu/~minsky/papers/Frames/frames.html>. Reprinted in *The Psychology of Computer Vision*, P. Winston (Ed.), McGraw-Hill, 1975.
- [Mitchell 2008] MITCHELL, Sandra: *Komplexitäten: Warum wir erst anfangen, die Welt zu verstehen (aus dem Englischen von Sebastian Vogel)*. Suhrkamp Verlag GmbH, 2008 (edition unseld). – URL <http://books.google.de/books?id=cSaQJAAACAAJ>. – ISBN 9783518260012
- [Moulines 2006] MOULINES, C.: Ontology, reduction, emergence: A general frame. In: *Synthese* 151 (2006), Nr. 3, S. 313–323. – ISSN 0039-7857
- [Moulines 1979] MOULINES, C. U.: Theory-nets and the evolution of theories: The example of Newtonian mechanics. In: *Synthese* 41 (1979), jul, Nr. 3, S. 417–439
- [Moulines 1984] MOULINES, C. U.: Ontological reduction in the natural sciences. In: BALZER, Wolfgang (Hrsg.) ; PEARCE, David A. (Hrsg.) ; SCHMIDT, Heinz-Jürgen (Hrsg.): *Reduction in Science*. Dordrecht : D. Reidel, 1984, Kap. Reduction in science – Structure, examples, philosophical problems
- [Moulines 1992] MOULINES, C. U.: Towards a Typology of Intertheoretical Relations. In: ECHEVERRIA, Javier (Hrsg.) ; IBARRA, Andoni (Hrsg.) ; MORMANN, Thomas (Hrsg.): *The Space of mathematics: philosophical, epistemological, and historical explorations*. Walter de Gruyter, 1992, S. 403–411
- [Moulines 1994] MOULINES, C. U.: Wer bestimmt, was es gibt?: Zum Verhältnis zwischen Ontologie und Wissenschaftstheorie. In: *Zeitschrift für philosophische Forschung* 48 (1994), Nr. 2, S. 175–191. – ISSN 0044-3301
- [Moulines 1996] MOULINES, C. U.: Structuralism: The Basic Ideas. In: BALZER, Wolfgang (Hrsg.) ; MOULINES, C. U. (Hrsg.): *Structuralist theory of science – Focal issues, new results*. Berlin, New York : de Gruyter, 1996, S. 1–13
- [Moulines und Polanski 1996] MOULINES, C. U. ; POLANSKI, Marek: Bridges, Constraints, and Links. In: BALZER, Wolfgang (Hrsg.) ; MOULINES, C. U. (Hrsg.): *Structuralist Theory of Science*. Berlin, New York : de Gruyter, 1996, Kap. Structuralist theory of science – Focal issues, new results
- [Nagel 1971] NAGEL, Ernest: *The structure of science : problems in the logic of scientific explanation*. 3. London : Routledge & Kegan Paul, 1971

- [Nebel 1990] NEBEL, Bernhard ; SIEKMANN, J. (Hrsg.): *Lecture Notes in Artificial Intelligence*. Bd. 422: *Reasoning and revision in hybrid representation systems*. 2. Heidelberg : Springer, 1990
- [Neurath 1931] NEURATH, Otto: Soziologie im Physikalismus. In: *Erkenntnis* 2 (1931), S. 393–431. – ISSN 18762514
- [Neurath 1932] NEURATH, Otto: Protokollsätze. In: *Erkenntnis* 3 (1932), Nr. 1, S. 204–214
- [Neurath 1938] NEURATH, Otto: Unified Science as Encyclopedic Integration. In: NEURATH, Otto (Hrsg.) ; BOHR, Niels (Hrsg.) ; DEWEY, John (Hrsg.) ; RUSSELL, Bertrand (Hrsg.) ; CARNAP, Rudolph (Hrsg.) ; MORRIS, Charles W. (Hrsg.): *International Encyclopedia of Unified Science* Bd. 1. Chicago : University of Chicago, 1938, S. 1–27
- [Newell 1981] NEWELL, Allen: The Knowledge Level. In: *Artif. Intell.* 18 (1981), Nr. 1, S. 87–127
- [Newell und Simon 1976] NEWELL, Allen ; SIMON, Herbert A.: Computer science as empirical inquiry: symbols and search. In: *Communications of the ACM* 19 (1976), Nr. 3, S. 113–126
- [Newell u. a. 1972] NEWELL, Allen ; SIMON, Herbert A. u. a.: *Human problem solving*. Prentice-Hall Englewood Cliffs, NJ, 1972
- [Niebergall 2002] NIEBERGALL, Karl-Georg: Structuralism, Model Theory and Reduction. In: *Synthese* 130 (2002), Januar, Nr. 1, S. 135–162
- [Niles und Pease 2001] NILES, Ian ; PEASE, Adam: Towards a standard upper ontology. In: *FOIS '01: Proceedings of the international conference on Formal Ontology in Information Systems*. New York, NY, USA : ACM, 2001, S. 2–9. – ISBN 1-58113-377-4
- [Nisbet 1980] NISBET, Robert A.: *History of the Idea of Progress*. Transaction publishers, 1980
- [Nora u. a. 1979] NORA, Simon ; MINC, Alain ; KALBHEN, Uwe: *Die Informatisierung der Gesellschaft*. Campus Verlag Frankfurt am Main/New York, 1979
- [Noy und Klein 2004] NOY, Natalya F. ; KLEIN, Michel: Ontology Evolution: Not the Same as Schema Evolution. In: *Knowledge and Information Systems* 6 (2004), jul, Nr. 4, S. 428–440
- [Noy u. a. 2004] NOY, Natalya F. ; MUSEN, Mark u. a.: Ontology versioning in an ontology management framework. In: *Intelligent Systems, IEEE* 19 (2004), Nr. 4, S. 6–13
- [Noy und Musen 2000] NOY, Natalya F. ; MUSEN, Mark A.: PROMPT: Algorithm and Tool for Automated Ontology Merging and Alignment. In: *Proceedings of the National Conference on Artificial Intelligence*, 2000
- [Nugroho und Chaudron 2009] NUGROHO, Ariadi ; CHAUDRON, Michel R.: Evaluating the impact of UML modeling on software quality: An industrial case study. In: *Model driven engineering languages and systems*. Springer, 2009, S. 181–195
- [Oppenheim und Putnam 1958] OPPENHEIM, Paul ; PUTNAM, Hilary: Unity of science as a working hypothesis. In: *Minnesota Studies In The Philosophy Of Science Volume* 2 (1958), S. 3–36

- [Palma u. a. 2009] PALMA, Raul ; HAASE, Peter ; CORCHO, Oscar ; GÓMEZ-PÉREZ, Asunción: Change Representation For OWL 2 Ontologies. In: HOEKSTRA, Rinke (Hrsg.) ; PATEL-SCHNEIDER, Peter F. (Hrsg.): *Proceedings of the 5th International Workshop on OWL: Experiences and Directions (OWLED 2009)*, URL http://www.webont.org/owled/2009/papers/owled2009_submission_14.pdf, October 2009
- [Parent und Spaccapietra 2009] PARENT, Christine ; SPACCAPIETRA, Stefano: An overview of modularity. In: *Modular Ontologies*. Springer, 2009, S. 5–23
- [Parnas und Clements 1986] PARNAS, David L. ; CLEMENTS, Paul C.: A rational design process: How and why to fake it. In: *Software Engineering, IEEE Transactions on* (1986), Nr. 2, S. 251–257
- [Patel-Schneider u. a. 2004] PATEL-SCHNEIDER, Peter F. ; HAYES, Patrick ; HORROCKS, Ian: *OWL Web Ontology Language Semantics and Abstract Syntax*. 02 2004. – URL <http://www.w3.org/TR/2004/REC-owl-semantics-20040210/>
- [Peirce 1931–1958] PEIRCE, Charles S. ; HARTSHORNE, Charles (Hrsg.) ; WEISS, Paul (Hrsg.): *Collected Papers of Charles Sanders Peirce*. Bd. 5. Harvard University Press, 1931–1958
- [Perez und Benjamins 1999] PEREZ, Asuncion G. ; BENJAMINS, V. R.: Overview of Knowledge Sharing and Reuse Components: Ontologies and Problem-Solving Methods. In: *Proceedings of the IJCAI-99 workshop on Ontologies and Problem-Solving methods (KRR5) Stockholm, 1999*
- [Planck 1949] PLANCK, Max: *Vorträge und Erinnerungen*. 5. Stuttgart : S. Hirzel, 1949. – (Erstausgabe 1933)
- [Plotkin 1982] PLOTKIN, Henry C.: *Learning, development, and culture: essays in evolutionary epistemology*. New York : John Wiley & Sons, 1982
- [Poli 2015] POLI, Roberto: Belief Systems and the Modeling Relation. In: *Foundations of Science* (2015), S. 1–12. – ISSN 1572-8471
- [Ponzetto und Navigli 2009] PONZETTO, Simone P. ; NAVIGLI, Roberto: Large-Scale Taxonomy Mapping for Restructuring and Integrating Wikipedia. In: *IJCAI* Bd. 9, 2009, S. 2083–2088
- [Popper 1994] POPPER, Karl R.: *Logik der Forschung*. Mohr, 1994. – (1935)
- [Popper 1972] POPPER, Karl R.: *Objective knowledge: An evolutionary approach*. Clarendon Press Oxford, 1972
- [Psillos 2000] PSILLOS, Stathos: Rudolf Carnap's 'Theoretical Concepts in Science'. In: *Studies in History and Philosophy of Science Part A* 31 (2000), Nr. 1, S. 151–172
- [van Quine 1980] QUINE, Willard O. van: *Wort und Gegenstand*. Reclam Stuttgart, 1980
- [Quine 1979] QUINE, Willard van O.: Was es gibt. In: *Von einem logischen Standpunkt*. Frankfurt/M : Ullstein, 1979. – dt. Übersetzung durch Peter Bosch. aus *On What There Is*, *Review of Metaphysics*, vol.2, 1948
- [Quine 1980] QUINE, Willard Van O.: Two Dogmas of Empiricism. In: *From a logical point of view: 9 logico-philosophical essays* Bd. 9. Harvard University Press, 1980
- [Reddy 1988] REDDY, Raj: Foundations and grand challenges of artificial intelligence: AAAI presidential address. In: *AI Magazine* 9 (1988), Nr. 4, S. 9

- [Roddick 1995] RODDICK, John F.: A survey of schema versioning issues for database systems. In: *Information and Software Technology* 37 (1995), Nr. 7, S. 383–393. – ISSN 0950-5849
- [Royce 1970] ROYCE, Winston W.: Managing the development of large software systems: concepts and techniques. In: *Proc. IEEE WESTCON*, IEEE Press, August 1970. – Reprinted in *Proc. Int’l Conf. Software Engineering (ICSE)* 1989, ACM Press, pp. 328–338
- [Sabou u. a. 2005] SABOU, Marta ; WROE, Chris ; GOBLE, Carole ; STUCKENSCHMIDT, Heiner: Learning domain ontologies for semantic web service descriptions. In: *Web Semantics: Science, Services and Agents on the World Wide Web* 3 (2005), Nr. 4, S. 340–365
- [Sarkar 1992] SARKAR, Sahotra: Models of reduction and categories of reductionism. In: *Synthese* 91 (1992), jun, Nr. 3, S. 167–194
- [Sattler u. a. 2003] SATTLER, Ulrike ; CALVANESE, Diego ; MOLITOR, Ralf: Relationships with other formalisms. In: [Baader u. a., 2003], S. 137–177
- [Scheffe 1999] SCHEFFE, Peter: Softwaretechnik und Erkenntnistheorie. In: *Informatik-Spektrum* 22 (1999), Nr. 2, S. 122–135
- [Scheibe 1997] SCHEIBE, Erhard: *Die Reduktion physikalischer Theorien – Ein Beitrag zur Einheit der Physik*. Berlin, Heidelberg : Springer, 1997
- [Schopen 2002] SCHOPEN, Michael: ICD-10-SGBV – A Special Adaptation for the Outpatient Sector of the German Health Care System / Deutsches Institut für Medizinische Dokumentation und Information. 2002. – Forschungsbericht
- [Schwill 2003] SCHWILL, Andreas: Informatics – The Science of Minimal Systems with Maximal Complexity. In: *Informatics and the Digital Society*. Springer, 2003, S. 17–28
- [Schäufler u. a. 2009] SCHÄUFLER, Christian ; ARTMANN, Stefan ; BECKSTEIN, Clemens: A Structuralistic Approach to Ontologies. In: MERTSCHING, B. (Hrsg.): *KI 2009: Advances in Artificial Intelligence* Bd. 5803. Berlin / Heidelberg : Springer, 2009, S. 363–370
- [Schäufler u. a. 2013] SCHÄUFLER, Christian ; BECKSTEIN, Clemens ; ARTMANN, Stefan: A Philosophical Foundation for Ontology Alignments–The Structuralistic Approach. In: TIMM, Ingo J. (Hrsg.) ; THIMM, Matthias (Hrsg.): *KI 2013: Advances in Artificial Intelligence*. Springer, 2013, S. 224–235
- [Seevinck 2004] SEEVINCK, M. P.: Holism, physical theories and quantum mechanics. In: *Studies In History and Philosophy of Science Part B: Studies In History and Philosophy of Modern Physics* 35 (2004), Nr. 4, S. 693–712. – ISSN 1355-2198
- [Shortliffe 1976] SHORTLIFFE, Edward H.: *MYCIN: Computer-based medical consultations*. Elsevier, New York, 1976
- [Siegel u. a. 2004] SIEGEL, Nick ; GOOLSBY, Keith ; KAHLERT, Robert ; MATTHEWS, Gavin: The Cyc System: Notes on Architecture. In: *Cycorp, Inc* 9 (2004)
- [Simmons 1966] SIMMONS, R. F.: Storage and retrieval of aspects of meaning in directed graph structures. In: *journal name* 9 (1966), Nr. 3, S. 211–215. – ISSN 0001-0782
- [Simon u. a. 1994] SIMON, Herbert A. ; WIENER, Oswald ; WIENER, U: *Die Wissenschaften vom Künstlichen*. Springer Wien, 1994

- [Sirin u. a. 2007] SIRIN, Evren ; PARSIA, Bijan ; GRAU, Bernardo C. ; KALYANPUR, Aditya ; KATZ, Yarden: Pellet: A Practical OWL-DL Reasoner. In: *Web Semant.* 5 (2007), Juni, Nr. 2, S. 51–53. – URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.websem.2007.03.004>. – ISSN 1570-8268
- [Smith 2004] SMITH, Barry: Beyond Concepts: Ontology as Reality Representation. In: *Proceedings of FOIS 2004*, 2004
- [Smith 2005] SMITH, Barry: Against Fantology. In: MAREK, M. E. Reicher; J. C. (Hrsg.): *Experience and Analysis*. Wien, 2005, S. 153–170
- [Smith u. a. 2007] SMITH, Barry ; ASHBURNER, Michael ; ROSSE, Cornelius ; BARD, Jonathan ; BUG, William ; CEUSTERS, Werner ; GOLDBERG, Louis J. ; EILBECK, Karen ; IRELAND, Amelia ; MUNGALL, Christopher J. ; LEONTIS, Neocles ; ROCCA-SERRA, Philippe ; RUTTENBERG, Alan ; SANSONE, Susanna-Assunta ; SCHEUERMANN, Richard H. ; SHAH, Nigam ; WHETZEL, Patricia L. ; LEWIS, Suzanna: The OBO Foundry: coordinated evolution of ontologies to support biomedical data integration. In: *Nat Biotech* 25 (2007), Nov., Nr. 11, S. 1251–1255. – ISSN 1087-0156
- [Smith und Kumar 2004] SMITH, Barry ; KUMAR, Anand: Controlled vocabularies in bioinformatics: a case study in the gene ontology. In: *Drug Discovery Today: BIOSILICO* 2 (2004), Nr. 6, S. 246–252
- [Smith und Mark 2003] SMITH, Barry ; MARK, David M.: Do Mountains Exist?: Towards an Ontology of Landforms. In: *Environment an Planning (Planning and Design)* 30 (2003), S. 411–427
- [Smith und Welty 2001] SMITH, Barry ; WELTY, Christopher: Ontology: Towards a new synthesis. In: *Proceedings of the international conference on formal ontology in information systems (FOIS)*. Ogunquit, Maine : ACM Press, 2001, S. 3–9
- [Smith u. a. 2004] SMITH, Michael K. ; WELTY, Chris ; MCGUINNESS, Deborah L.: *Wine Ontology – An example OWL ontology*. 2004. – URL <http://www.w3.org/TR/2004/REC-owl-guide-20040210/wine.rdf>
- [Sneed 1971a] SNEED, Joseph D.: *The logical structure of mathematical physics*. 1. Dordrecht : Reidel, 1971
- [Sneed 1971b] SNEED, Joseph D.: The Ramsey View Emended. In: *The Logical Structure of Mathematical Physics*. Springer, 1971, S. 65–95
- [Sowa 2005] SOWA, John F.: Building, Sharing and Merging Ontologies. (2005). – URL <http://www.jfsowa.com/ontology/ontoshar.htm>
- [Spencer 1873] SPENCER, Herbert: *The Study of Sociology*. London : King, 1873. – URL <http://oll.libertyfund.org/titles/1335>
- [Stanford University 2006] STANFORD UNIVERSITY: *Protégé*. 2006. – URL <http://protege.stanford.edu>
- [Stegmüller 1989] STEGMÜLLER, Wolfgang: Hauptströmungen der Gegenwartsphilosophie, Bd. 1-3. (1989)
- [Stegmüller 1986] STEGMÜLLER, Wolfgang: *Theorie und Erfahrung. Die Entwicklung des neuen Strukturalismus seit 1973*. Springer, 1986
- [Stojanovic 2004] STOJANOVIC, Ljiljana: *Methods and Tools for Ontology Evolution*, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften der Universität Fridericiana zu Karlsruhe, Dissertation, 2004

- [Stojanovic u. a. 2002] STOJANOVIC, Ljiljana ; MAEDCHE, Alexander ; MOTIK, Boris ; STOJANOVIC, Nenad: User-Driven Ontology Evolution Management. In: *Knowledge Engineering and Knowledge Management: Ontologies and the Semantic Web* Bd. 2473/2002. Springer, 2002
- [Stumme und Maedche 2001] STUMME, Gerd ; MAEDCHE, Alexander: FCA-merge: bottom-up merging of ontologies. In: *Proc. 17th IJCAI*. Seattle (WA US), 2001, S. 225–230
- [Subrahmanian 1994] SUBRAHMANIAN, V. S.: Amalgamating knowledge bases. In: *ACM Trans. Database Syst.* 19 (1994), June, Nr. 2, S. 291–331. – ISSN 0362-5915
- [Suppes 1957] SUPPES, Patrick: *Introduction to logic*. New York : D. Van Nostrand Company, 1957
- [Suppes 1978] SUPPES, Patrick: The plurality of science. In: *PSA: Proceedings of the Biennial Meeting of the Philosophy of Science Association* JSTOR (Veranst.), 1978, S. 3–16
- [Sure und Tempich 2004] SURE, Y. ; TEMPICH, C.: State of the art in ontology engineering methodologies. In: *SEKT informal deliverable 7.1.2*, (2004)
- [Tarski 1983] TARSKI, Alfred: The Concept of Truth in Formalized Languages. In: CORCORAN, J. (Hrsg.): *Logic, Semantics, Metamathematics*. 2. Hackett, 1983, S. 152–278. – translation by J.H. Woodger, polish source of 1935
- [Thomson 1982] THOMSON, Keith S.: Marginalia: The meanings of evolution. In: *American Scientist* 70 (1982), Nr. 5, S. 529–531. – ISSN 00030996
- [Walker 1986] WALKER, Adrian: Knowledge Systems: Principles and Practise. In: *IBM Journal of Research and Development* (1986), January, S. 2–13
- [Wehling 2003] WEHLING, Peter: Wissenschaft in der Wissensgesellschaft: Hegonomie oder Bedeutungsverlust? In: BÈOSCHEN, Stefan (Hrsg.) ; SCHULZ-SCHAEFFER, Ingo (Hrsg.): *Wissenschaft in der Wissensgesellschaft*. Springer, 2003, S. 119–142
- [Weinberg 1987] WEINBERG, Steven: Newtonianism, reductionism and the art of congressional testimony. In: *Nature* 330 (1987), dec, Nr. 6147, S. 433–437
- [Weingart 2005] WEINGART, Peter: *Die Stunde der Wahrheit? Zum Verhältnis der Wissenschaft zu Politik, Wirtschaft und Medien in der Wissensgesellschaft*. Weilerswist : Velbrück Wiss., 2005
- [von Weizsäcker 1971] WEIZSÄCKER, C. F. von: *Die Einheit der Natur: Studien*. München : Hanser, 1971 (Wissenschaftliche Reihe). – ISBN 9783446113862
- [Welty u. a. 1999] WELTY, Chris ; USCHOLD, Michael ; GRUNINGER, Michael ; LEHMANN, Fritz ; MCGUINNESS, Deborah: Ontologies: Expert Systems all over again? In: *Invited panel at American Association for Artificial Intelligence National Conference (AAAI-99)*, URL <http://www.cs.vassar.edu/~weltyc/aaai-99/>, 1999
- [Wittgenstein 2003] WITTGENSTEIN, Ludwig: *Tractatus logico-philosophicus, Logisch-philosophische Abhandlung*. Frankfurt am Main : Suhrkamp, 2003
- [Wittmann 1959] WITTMANN, Waldemar: *Unternehmung und unvollkommene Information*. Westdeutscher Verlag, 1959
- [Wohlgenannt 1969] WOHLGENANT, Rudolf: *Was ist Wissenschaft?* Springer, 1969
- [Wong u. a. 2012] WONG, Wilson ; LIU, Wei ; BENNAMOON, Mohammed: Ontology

- learning from text: A look back and into the future. In: *ACM Computing Surveys (CSUR)* 44 (2012), Nr. 4, S. 20:1–20:36
- [Wooldridge 2000] WOOLDRIDGE, Michael: *Reasoning about Rational Agents*. Cambridge : The MIT Press, 2000
- [World Health Organization 2016] WORLD HEALTH ORGANIZATION: *International statistical classification of diseases and related health problems*. Bd. 2. 5. Geneva : World Health Organization, 2016
- [WSIS 2005] WSIS, Executive S.: Tunis Commitment. In: *World Summit on the Information Society*. Tunis, 2005, S. 1–5. – URL <http://www.itu.int/wsis/docs2/tunis/off/7.html>. – WSIS-05/TUNIS/DOC/7 -E
- [Zhou 2007] ZHOU, Lina: Ontology learning: state of the art and open issues. In: *Information Technology and Management* 8 (2007), Nr. 3, S. 241–252
- [Zimmermann und Euzenat 2006] ZIMMERMANN, Antoine ; EUZENAT, Jérôme: Three Semantics for Distributed Systems and Their Relations with Alignment Composition. In: CRUZ, Isabel (Hrsg.) ; DECKER, Stefan (Hrsg.) ; ALLEMANG, Dean (Hrsg.) ; PREIST, Chris (Hrsg.) ; SCHWABE, Daniel (Hrsg.) ; MIKA, Peter (Hrsg.) ; USCHOLD, Mike (Hrsg.) ; AROYO, Lora (Hrsg.): *The Semantic Web - ISWC 2006* Bd. 4273, Springer Berlin / Heidelberg, 2006, S. 16–29
- [Zimmermann u. a. 2006] ZIMMERMANN, Antoine ; KRÖTZSCH, Markus ; EUZENAT, Jérôme ; HITZLER, Pascal: Formalizing Ontology Alignment and its Operations with Category Theory. In: *Proceeding of the 2006 conference on Formal Ontology in Information Systems*. Amsterdam, The Netherlands, The Netherlands : IOS Press, 2006, S. 277–288. – ISBN 1-58603-685-8

Ehrenwörtliche Erklärung

Hiermit erkläre ich,

- daß mir die geltende Promotionsordnung der Fakultät für Mathematik und Informatik Jena bekannt ist,
- daß ich die Dissertation selbst angefertigt habe,
- daß ich keine Textabschnitte oder Ergebnisse eines Dritten oder eigener Prüfungsarbeiten ohne Kennzeichnung übernommen habe,
- daß ich alle benutzten Hilfsmittel, persönlichen Mitteilungen und Quellen angegeben habe,
- daß ich keine Hilfe eines Promotionsberaters in Anspruch genommen habe,
- daß Dritte weder unmittelbar noch mittelbar geldwerte Leistungen von mir für Arbeiten erhalten haben, die im Zusammenhang mit dem Inhalt der vorgelegten Dissertation stehen,
- daß ich die Dissertation noch nicht als Prüfungsarbeit für eine staatliche oder andere wissenschaftliche Prüfung eingereicht habe und
- daß ich nicht die gleiche, eine in wesentlichen Teilen ähnliche oder eine andere Abhandlung bei einer anderen Hochschule als Dissertation eingereicht habe.

Jena, den 22. Juni 2017

.....